



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Doris Turk**

**PUIDUST VAHELAETALADE UURIMINE KIVISEINA  
SEESTPOOLT SOOJUSTAMISEL**

INVESTIGATION OF WOODEN BEAM ENDS IN MASONRY  
WALL WITH INTERNAL INSULATION

Magistritöö  
Maaehituse õppekava

Juhendaja: lektor Kadri Leiten, *MSc*

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
F.R.Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Autor: Doris Turk		Õppekava: maaehitus	
Pealkiri: Puidust vahelaetalade uurimine kiviseina seestpoolt soojustamisel			
Lehekülgi: 116	Jooniseid: 57	Tabeleid: 7	Lisasid: 15
Osakond / Õppetool: Metsandus- ja maaehitusinstituut / Maaehituse ja veemajanduse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond Tsiviilehitus, T220			
ja CERC S-i kood:			
Juhendaja(d):		lektor Kadri Leiten	
Kaitsmiskoht ja aasta:		Tartu, 2021	
<p>Soojusliku mugavuse suurendamise tõttu on hakatud ka vanu hooneid rekonstrueerima. Seespidiselt soojustades saavutatakse soojem, kuid mitte alati tervislik, sisekliima. Antud töö üheks eesmärgiks oli uurida, kuidas kahe õhkvahega telliskiviseinte seestpoolt soojustamine mõjub vahelaetaladele. Teine eesmärk oli simulatsiooniprogrammidega vaadelda piirdetarindi käitumist hallituse ja kondensaadi testaastate ja autori kogutud andmevahemiku jooksul ning simulatsiooniga modelleerida paremaid lahendusi seestpoolseks lisasoojustamiseks vaadeldaval katseobjektil. Magistritöö hüpoteesiks püstitas autor, et seestpoolne lisasoojustamine ei mõju vahelaetaladele hävitavalt. Arvutustes ja arvutisimulatsioonides kasutati rockwool SUPERROCK mineraalvilla, Gyproc kipsplaati, nordic quattro laepaneele ja juba vahelaes olemasolevaid materjale. Puidust vahelaetaladega kivisein asub Eestis, Tartu maakonnas, Vasula alevikus, Mõisaringi tänaval, põhja ilmakaares. Katsevahelae talade otstes paigaldati temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse andurid. Käsitsi arvutustes kasutati Glaseri meetodit ning simulatsiooniprogrammidena kasutati Therm'i ja Delphini tarkvara. Arvutustes ja simulatsioonides järgiti Eesti Vabariigis kehtivaid standardeid ja norme ning kasutati hallituse ja kondensatsiooni testaastaid.</p> <p>Antud magistritööst selgub, et hallitust vahelaetalade otstes tekkida ei tohiks, kui tekib, siis on see tuvastatav vaid mikroskoobi all. Ilma aurutõkketa on suurem võimalus niiskusel välja aurustuda, seda pikema perioodi jooksul, kui arvutustes kasutatud. Aurutõkke Isover Vario KM Duplex UV kasutamisel seisab niiskus aurutõkke juures ning ei kuiva sisse- ega väljapoole. Soojustuse lisamisega sisepinnale ja vahelae alla parandas soojusläbivust tarindis 2,1 korda ning suurendas soojuslikku mugavust.</p> <p>Seestpoolse soojusisolatsioonisüsteemiga vahelaesõlmedele on tehtud erinevaid uuringuid, kuid mitte ükski ei ole käsitlenud selles magistritöös vaadeldavat vahelaesõlmele sarnast sõlme. Sellist vahelaesõlme võiks pikemaajaliselt veel uurida. Tulevikus võiks uurida ka olukorda, kus mõlemal korrusel on eluruumile omane niiskusklass ja kuidas siis vahelaetaladele erinevate soojustusmaterjalidega soojustamine mõjub.</p>			
Märksõnad: puit vahelaetalad, seestpoolne soojustamine, kivisein, õhkvahe, Delphin			

Estonian University of Life Sciences		<b>Abstract of Master's Thesis</b>	
F.R.Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Author: Doris Turk		Speciality: rural building	
Title: Investigation of wooden beam ends in masonry wall with internal insulation			
Pages: 116	Figures: 57	Tables: 7	Appendixes: 15
Department / Chair:	Institute of Forestry and Rural Engineering / Chair of Rural Building and Water Management		
Field of research and (CERC S) code:	Civil engineering, T220		
Supervisors:	lecturer Kadri Leiten		
Place and date:	Tartu, 2021		
<p>Due to the increase in thermal comfort, the old buildings have also been reconstructed. By insulating internally, achieve a warmer, but not healthy, indoor climate.</p> <p>One of the aims of this thesis was to study how the internal insulation of brick walls with two air gaps would affect the wooden ceiling beams. The second aim was to use simulation programs to observe the behavior of the boundary structure during the mould and condensate test years and the data range collected by the author, and to simulate better solutions for additional internal insulation on the observed test object. As a hypothesis for the master's thesis, the author stated that the additional internal insulation does not have a destructive effect on the wooden beams.</p> <p>Rockwool SUPERROCK mineral wool, Gyproc gypsum board, nordic quattro ceiling panels and the materials already existing in the ceiling were used in the calculations and computer simulations. The masonry wall with wooden beams is located in Tartu county, Vasula, Mõisaringi street. Temperature and relative humidity sensors were installed at the ends of the test wooden beams. Therm and Delphin software were used for the simulations and the Glaser method was used for manual calculations. All calculations and simulations followed the standards and norms in force in the Republic of Estonia, as well as the mold and condensation test years.</p> <p>It can be concluded from this master's thesis that mold should not appear at the ends of wooden beams and if it does, it can be detected only under a microscope. Without a vapor barrier, there is a greater chance of moisture evaporating, albeit over a longer period of time than what was used in the calculations. When using a vapor barrier, the moisture stays at the vapor barrier and does not dry in or out. Adding insulation to the inner surface gave a 2,1 times better result in heat permeability and also increased thermal comfort.</p> <p>Various studies have been carried out on intermediate ceiling assemblies with an internal thermal insulation system, but none have dealt with the intermediate ceiling assembly-like assembly that has been dealt with in this master's thesis. Therefore, such an intermediate floor could be studied in the longer term. In the future, it should be studied a situation where the humidity class on both floors would be suitable for a dwelling and how insulation with different insulation materials of the partition beams would be affected then.</p>			
Keywords: wooden beams, internal insulation, masonry wall, air gap, Delphin			

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	8
1.1. Uuritava hoone asukoht ja ajalugu.....	8
1.2. 20.sajandil ehitatud kivihooned ja puidust vahelaed .....	9
1.3. Kiviseinte seespoolne soojusisolatsioonisüsteem ja selle mõju vahelaetaladele..	13
1.4. Uuringute tulemused kirjanduse põhjal .....	16
1.4.1. Avatud talaotsad .....	16
1.4.2. Tihendatud talaotsad.....	17
1.4.3. Vaskplaatidega temperatuuri hoidmine talaotstes .....	18
1.5. Külmasillad.....	20
1.6. Hallitus.....	22
1.7. Niiskus ehitustarindis.....	23
1.8. Poliüuretaan- ehk PUR-vaht .....	24
1.9. Kivivill .....	25
1.10. Intelligentne aurutõke.....	26
2. MÕÕTMISMETOODIKA JA KATSETAMINE .....	27
2.1. Katsete eesmärk .....	27
2.2. Katseobjekti asukoht ja kirjeldus .....	27
2.3. Kasutatud ehitusmaterjalid .....	30
2.4. Katsevahelae ehitus.....	31
2.5. Andurite paigaldus .....	32
2.6. Katseseadmed .....	33
2.6.1. Alhborn Almemo 2890-9 andmesalvesti .....	33
2.6.2. Ahlborn FHA 646 R sensorid.....	34
2.6.3. Onset HOBO U12-011 andmesalvesti.....	35
3. METOODIKA .....	36
3.1. Kastepunkti ehk Glaseri meetod .....	36
3.2. THERM .....	42
3.3. Delphin.....	43
3.3.1. Delphini simulatsioonis kasutatav välis- ja sisekliima.....	44
4. TULEMUSED JA ANALÜÜS .....	48
4.1. Kastepunkti meetodi tulemused ja analüüs.....	48
4.1.1. Soojustamata välissein.....	48

4.1.2. Seespoolse soojusisolatsiooniga välissein .....	51
4.2. Vahelaesõlm.....	56
4.2.1. Soojustamata välisseina ja vahelae uurimine Thermiga.....	56
4.2.2. Soojustatud välisseina ja vahelae uurimine Thermiga .....	57
4.2.3. Hallituse tekke kontrollimine Delphiniga vahelaesõlmele .....	58
4.2.4. Kondensatsioonitekke kontrollimine Delphiniga vahelaesõlmele .....	62
4.2.5. Mõõdetud perioodi omakliima tulemused Delphiniga .....	67
4.3. Tulemuste kokkuvõte.....	73
KOKKUVÕTE .....	75
KASUTATUD ALLIKAD .....	77
LISAD.....	81
Lisa 1. Katsevahelae mõõtmistulemused.....	82
Lisa 2. Materjalide tehnilised näitajad.....	91
Lisa 3. Seespoolse soojusisolatsiooniga sein kondenseerumise ja aurustumise arvutamine kihtide vahel .....	92
Lisa 4. Temperatuuride ja niiskuse jaotus analüüsitava seinas iga kuu kohta .....	93
Lisa 5. Suhtelise õhuniiskuse sisaldus ja temperatuur soojustatud vahelaesõlmel koos aurutõkkega kondensaadi testaasta kevade keskpaigas .....	105
Lisa 6. Suhtelise õhuniiskuse sisaldus ja temperatuur soojustatud vahelaesõlmel aurutõkketa kondensaadi testaasta kevade keskpaigas.....	106
Lisa 7. Suhtelise õhuniiskuse sisaldus ja temperatuur soojustatud vahelaesõlmel koos aurutõkkega kondensaadi testaasta suve keskpaigas .....	107
Lisa 8. Suhtelise õhuniiskuse sisaldus ja temperatuur soojustatud vahelaesõlmel aurutõkketa kondensaadi testaasta suve keskpaigas.....	108
Lisa 9. Suhtelise õhuniiskuse sisaldus ja temperatuur soojustatud vahelaesõlmel koos aurutõkkega kondensaadi testaasta sügise keskpaigas .....	109
Lisa 10. Suhtelise õhuniiskuse sisaldus ja temperatuur soojustatud vahelaesõlmel aurutõkketa kondensaadi testaasta sügise keskpaigas .....	110
Lisa 11. Temperatuur soojustatud vahelaesõlmel aurutõkketa ja aurutõkkega kondensaadi testaasta talve keskpaigas .....	111
Lisa 12. II korruse ruumi kütmistabel.....	112
Lisa 13. Delphini mõõdetud omakliima tihendatud ja avatud talaotste temperatuurid .	113
Lisa 14. Katseandmete temperatuurid ja suhtelised õhuniiskused graafikul .....	114
Lisa 15. Lihtlitsents .....	116

## SISSEJUHATUS

Tänapäeval on uute hoonete ehitamisel järjest suuremad ja rangemad nõuded, seda eriti energiatõhususe osas. Nõuded on nii madalenergiahoonetel, liginullenergia hoonetel, palkmajadel kui ka olemasolevatel rekonstrueeritavatel hoonetel ja seda selleks, et hoida kokku kulusid kütelt kui ka atmosfääri reostuse osas.

Igas hoones soovib inimene tunda end mugavalt ja seetõttu on hakatud ka vanu hooneid rekonstrueerima, pahatihti aga ehitusfüüsikaliselt valesti. Soojusliku mugavuse suurendamiseks soojustatakse hooneid üldjuhul väljastpoolt, kuid osad hooned on muinsuskaitseameti poolt määratud kultuurimälestisteks ning neid ei ole võimalik renoveerida oma soovi järgi. Ehitismälestiseks tunnistatud hooneid tuleb rekonstrueerida selliselt, et nende konstruktiivsed ja dekoratiivsed elemendid, välisilme jääksid muutumatuks [53].

Tavalistes vanades elumajades soojusliku mugavuse suurendamiseks soojustatakse maju ka seepoolse soojusisolatsiooniga, mis ehitusfüüsikaliselt ei ole kõige õigem lahendus. Seepoolse soojustamise kasuks otsustatakse suuresti väiksema ressursikulukuse tõttu. Odavam on soojustada üks korter või tuba seepidiseks, kui terve hoone välispidiseks. Seepoolne lisasoojustamine võib tuua endaga kaasa kahjustusi nii hoone kui ka inimeste tervisele.

Antud töö üheks eesmärgiks oli uurida, kuidas kahe õhkvahega telliskiviseinte seestpoolt soojustamine mõjub vahelaetadele. Teine eesmärk oli simulatsiooniprogrammidega vaadelda piirdetarindi käitumist kogu testaastate ja autori kogutud andmevahemiku jooksul ning simulatsiooniga modelleerida paremaid lahendusi seepoolseks lisasoojustamiseks vaadeldaval katseobjektil. Magistritöö hüpoteesiks püstitas autor, et seepoolne lisasoojustamine ei mõju vahelaetadele hävitavalt.

Uuring viidi läbi Tartu maakonnas, Tartu vallas, Vasula alevikus, Mõisaringi tänav 1 aadressil. Katsevahelaega hoone valmis hiljemalt 1943.aastal ning katseid koguti 2020.aasta novembri keskpaigast kuni 2021.aasta märtsi keskpaigani. Sellel aadressil paiknev katsevahelagi sai valitud ligipääsetavuse ning sobilikkuse tõttu. I korruse korteris teostati

seespoolne lisasoojustamine 2019.aasta detsembri lõpus. II korruse korter vabanes elanikest ja avanes võimalus võtta põrand lahti ning paigaldada vahelaetalaotstesse temperatuuri- ja õhuniiskuse andurid.

Magistritöö sisuline osa on jaotatud neljaks põhijaotuseks. Esimene põhijaotus sisaldab töös kasutatud kirjanduse ülevaadet ja selle analüüsi. Teine põhijaotus on mõõtmismetoodika ja katsetamise kirjeldus. Kolmandas põhijaotises on kirjeldatud uurimismetoodikat ning antud kerge ülevaade arvutisimulatsioonitarkvaradest Therm ja Delphin. Neljandas põhijaotises on ülevaade anduritega mõõtmiste ja simulatsioonide modelleerimistulemustest ning jaotise lõpus võetakse töö tulemused kokku ja tuuakse välja sellel katseobjektil parim toimiv lahendus seespoolseks lisasoojustamiseks.

Magistritöös on viitamiseks kasutatud numbrilist süsteemi.

## **TÄNUAVALDUSED**

Autor tänab lõputöö juhendajat Kadri Leiteni kogu oma pühendatud aja ning abistamise ja õigele teele suunamise eest! Täname õppejõudu Martti-Jaan Miljanit, kes oli abiks arvutisimulatsiooniprogrammi Delphin ülesseadistamisel ning oli valmis ka alati aitama, ja õppejõudu Kaarel Sahka, kes oli abiks kirjanduse leidmisel nii internetist kui ka enda isiklikust raamatukogust. Lisaks tänab autor ka Tauri Turki, kes oli abiks nõu ja jõuga katsevahelae ehitamise ning andurite paigaldamisega.

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1. Uuritava hoone asukoht ja ajalugu

Uuritav hoone asub Tartumaal, Tartu vallas, Vasula alevikus, Amme jõe vasakul kaldal. Hoone kuulus Vasula mõisa juurde.

Esmakordselt on Vasula küla maininud Läti Henriku kroonikas 1220.aastal, sest kõik külaelanikud olid ristitud. Mõisa kohta on säilinud 1446.aasta ostu-müügileping, millest võib järeldada, et mõis oli olemas enne seda. Mõis on kuulunud Tartu linnale, Tartu kodanikule Tennetile ja viimasteks omanikeks oli Stiernhielmide perekond, kelle käes oli mõis 283 aastat (1636-1919.aastatel) kuni Eesti Vabariigi maareformini 25.oktoobril 1919.aastal. [1]

Tartu kodanik Tennet müüs mõisa Georg Stiernhielmile (sünninimega Göran Olofsson). Georg oli Stiernhielmide perekonnast esimene ja kõige väljapaistvam esindaja Vasulas. Ta oli õpetlane ja ka poet. Göran Olofssonile andis uue nime aadliseisusesse tõstmisega 1630.aastal Gustav II Adolf ning sellega seoses sai Vasula mõisast rüütlimõis. [1]

Pärast Eesti Vabariigi maareformi kehtestamist, oli mõis rendilepinguga veel Stiernhielmide perekonna käes. Mõisamaade jagamisel kruntideks jättis riik endale 10 krunti ning rentis need Tartu Maavalitsusele tütarlaste majapidamiskooli rajamiseks ning nimetatud kool lisati 1924.aastal majapidamiskoolide võrgustikku. Mõisahoonest ehk endisest härrastemajast sai alates 1925.aastast Vasula Kodumajanduskool. [1]

Teine suurem ja oluline hoone kooli juures oli mõisaaegne valitsejamaja, millel oli põllukividest sokkel, palkseinad ja sindelkatus. Valitsejamajas on olnud korterid, õppeklassid, talu kontor, lastetuba ja 1933.aastast ka eriklass. 1935.aastal oli valitsejamaja ärklikorrusel väike tulekahju ning kaks ärklituba sai kannatada. Hiljem lammutati valitsejamaja seoses uue kortermaja ehitamisega 1940.aastal vana valitsejamaja kohale või selle vahetusse lähedusse. Uus kortermaja valmis hiljemalt 1943.aastal ning pärast sõda renoveeriti sõjast tekkinud kahjustused Vasula Puukooli ehk sovhoosi poolt 1945.aastal. [1]



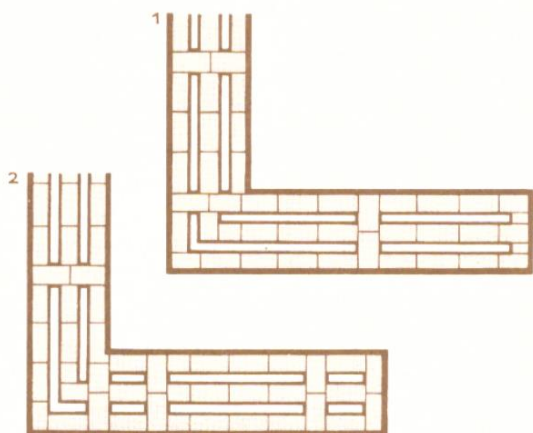
Uuel kortermajal on maakivist vundament, punastest tellistest laotud välisseinad ning täiskelpkatus. Antud kortermaja täidab oma eesmärgi tänaseni Mõisaringi 1 aadressil Vasula alevikus ning alaliselt on elanikke vähemalt seitsmes korteris.

## 1.2. 20.sajandil ehitatud kivihooned ja puidust vahelaed

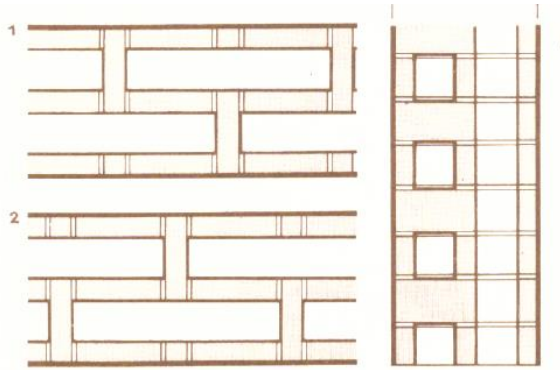
Antud magistritöös uuritava hoone välisseina kihid saadi teada välisel vaatlusel ning kontrollaukude puurimisega. Konstruktsioonis on kaks õhkvahet ja 3 rida telliseid. Selline konstruktsioon on pigem haruldane. Rohkem levinud ja kirjanduses väljatoodud tellisseina konstruktsioonid on üldjuhul ühe õhkvahega ning soojustuskihiga telliste vahel.

Õõnsused seintes peaks parandama soojusisolatsiooni, juhtima välja liigse niiskuse või siis tehti õõnsused materjali kokkuhoiu mõttes. Õõnsustega seinte omavahel ühendamiseks kasutati sidekive, -traate või lamedat rauda. Ühe õhkvahega müüritises avastati, et selles ringlev õhk hoopiski kannab soojust eemale, kui aitaks hoida. Samas ühe õhkvahe soojustakistus on samaväärne  $\frac{1}{2}$ -kivi müüritise lisapaksusega. Poolekivi laiuse õhkvahega hoiab kokku materjali, vähendab seina omakaalu ja soojustakistus ei lange. Lisaks sellele on tehtud 1905.aastal märges, et õhkvahe võib tekkida kondensvee oht. Selliste asjade vältimiseks ehitati kahe õhkvahega müüritised, milles olid ka ventilatsiooniavad. [2, 11]

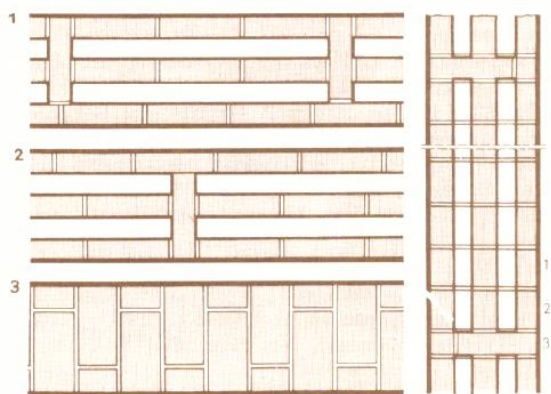
Vaadeldava objekti välisseinad on kahe õhkvahega, siis alljärgnevad joonised on sellele vastavad võimalikud seinakonstruktsioonid (vt Joonis 1, 2, 3).



**Joonis 1.** Võimalik kahe õhkvahega seinakonstruktsioon [2].



**Joonis 2.** Võimalik kahe õhkvahega seinakonstruktsioon [2].

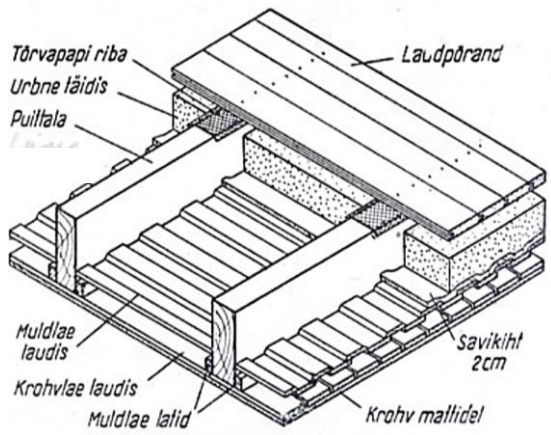


**Joonis 3.** Võimalik kahe õhkvahega seinakonstruktsioon. [2]

Puitvahelagede ehitamine on väga levinud seetõttu, et seda on lihtsam ehitada, nõuab vähe oskusi ehitajalt, materjal on kergem ning vahelae ehitamine on lõppkokkuvõttes odavam [3].

Sõjaeelsetes ja enne raudbetooni laialdasemat kasutusvõttu aastal 1950, olid puitvahelad kasutusel lisaks puidust majadele ka kivimajades. Tolleaegsed traditsioonilised puidust vahelad (vt. Joonis 4) olid talaristlõikega 10-12 cm × 20-25 cm, sammuga 90-100 cm. Talade alumisele äärele olid naelutatud kahele poole must- ehk mullalae latid, millele tehti peale 25 mm servatud või servamata laudadest laudis ning see kaeti omakorda savikihiga, mis andis vahelaele helipidavuse. Savikihi asemel võis kasutada ka pappi või ehituspaberit laudisevaheliste pilude katmiseks. Laudisepealne, talade vahel, täideti liiva, räbu, linaluude või sae- või turbapuruga. Mullalae laudise täide valiti vastavalt sellele, millist tulemust laelt oodati – soojust pidav, helikindel või tuldtõkestav. Talade alumisele küljele kinnitati naeltega 25 mm paksused lauad, millele omakorda ühe- või kahekordsed krohvimatid, mis üle krohviti. Talade alla võib, krohviimistluse asemel, lüüa ka hõõveldatud ja õlivärvi vms töödeldud laelauad. Talade ülemisele küljele tehti 37 mm hõõveldatud laudadest laudpõrand.

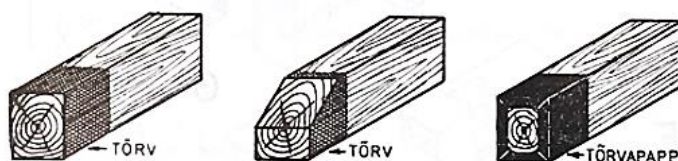
Vahelae sammumüra vähendamiseks kasutati rõhtprusse, mis asetati kas otse täidise peale talade vahele või talade peale risti (talad ja rõhtprussid seejuures eraldati vildiga). [10, 11, 12]



**Joonis 4.** Puitvahelagi (võimalik vaadeldav vahelaekonstruktsioon) [11].

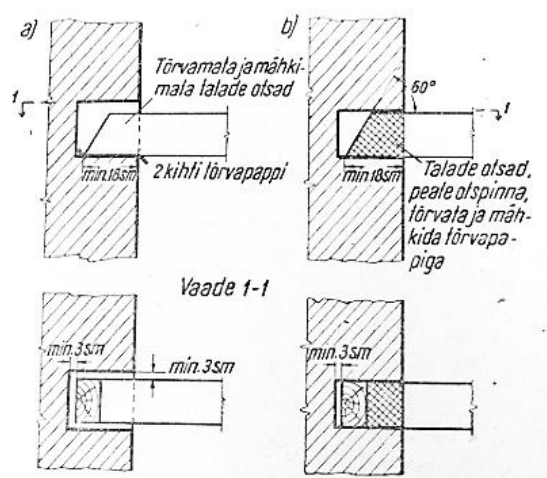
Eesti NSV Liidu Ministrite Nõukogu Riiklik Ehituskomitee on andnud välja 1959.aastal instruksiooni hoonete ja ehitiste puitelementide kaitse kohta mädanemise, puitu kahjustavate putukate ja süttimise eest. Antud instruksioonis on kirjas konstruktiivsete abinõudena, et kivimüüritisega hoonetes ei ole lubatud ehitada puitvahelagesid niiskete või märgade ruumide kohale. Sanitaarsõlmede kohale ehitavate puitvahelagede alumine pind tuleb töödelda aurisolatsioonikihiga. [4]

Kõetavates hoonetes tuleb talade otsad teha õhukindlalt – talaotsad lõigatakse kaldu, kaetakse 75 cm ulatuses antiseptilise pastaga ning see omakorda töödeldakse tõrva või bituumeniga ja kaetakse tõrvapapiga seina ulatuva osa pikkuses ja lisaks 5 cm seinapinnast väljapoole, kuid mitte mingil juhul talaotsa ristlõiget, sest niiskus peab saama välja kuivada (vt. Joonis 5). Tõrvatud talaotsa ristlõige aga niiskuse väljakuivamist ei võimalda ja seetõttu on oht hallituse ja mädanike tekkele. [3, 4, 11, 12]



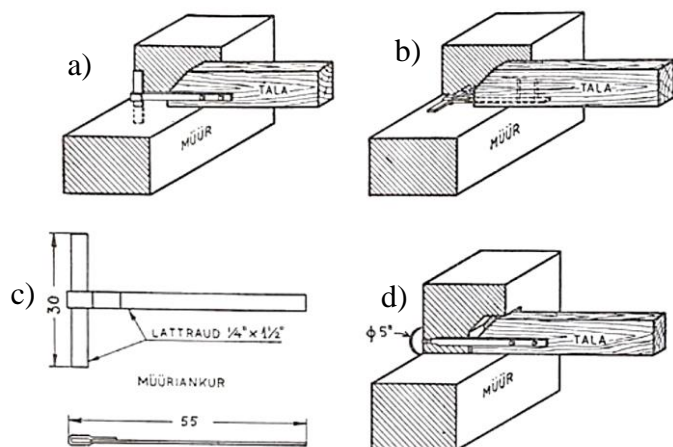
**Joonis 5.** Talaotste töötlemine [12].

Talad asetatakse kiviseinas olevasse talapessa vähemalt 18 cm pikkuselt isoleerituna tõrvapapist ümbrisega või kahekihilise katusepapi, ruberoidi vms. materjali peale, et eraldada tala küljed ja ots müüriaga kokkupuutest ning seda vähemalt 3 cm kaugusele pesa lõpust (vt. Joonis 6). Talapessa pannakse kinni mördiga. Õhkvahe tala ümbruses peab olema piisavalt suur, et õhul oleks võimalik vabalt liikuda talaotsa ümber. Talaotsa ja kiviseina vahe täitmine kivikildude või muuga on lubamatu, kuna sellega tekitatakse niiskusele tee müüritisest puitu. [3, 11, 12]

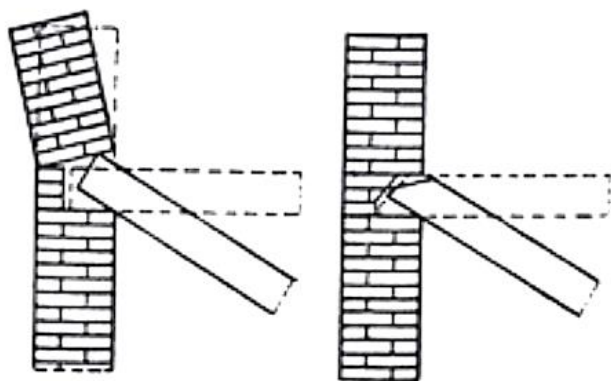


**Joonis 6.** Talaotste toetumine kiviseinale. a – lahtine tõrvamata talaots kivimüüritises, b – kinni müüritud tõrvatud talaots kivimüüritises. [3]

Talad tuleks kiviseina külge ankurdada terasankrutega, mille ristlõige on vähemalt 2 cm<sup>2</sup> ning ankrute samm iga kolmas või neljas tala. Ankru üks ots kinnitatakse müüritise sisse mördiga ning teine ots kinnitatakse tala külge naelte või poltidega. Ankrud olgu tala külge kinnitatud tala alaservale või külgpinnale (vt Joonis 7). Terasankru kinnitamisel külgpinnale tuleks jälgida, et see oleks kinnitatud madalamale kui 1/3 tala kõrgusest, vastasel juhul võib tala purunemisel (nt tulekahju olukorras vabanevad keskelt läbipõlenud viltu lõigatud talapeadega talad müüritist ümber lükkamata) ankur seina kaasa kiskuda (vt. Joonis 8). [11, 12]



**Joonis 7.** Vahelaetalade ankurdamisviisid kivimüüritises. a – külgpinna ankur, b – alaservaankur, c – ankru pealt- ja külgvaade mõõtudega, d – plaatankur. [12]



**Joonis 8.** Tulekahju olukorras puittala vabanemine müüritises. Kaldu lõikamata (vasakul) ja kaldu lõigatud (paremal) talaotsad. [12]

### 1.3. Kiviseinte seespoolne soojusisolatsioonisüsteem ja selle mõju vahelaetaladele

Olemasolevate vanade hoonete soojusläbivust soovitakse renoveerimise käigus parandada, kuid suuresti on suure hoone terviklik soojustamine välispidiselt kulukas või on fassaadide välisilmed säilitamist väärt (seda üldjuhul muinsuskaitse all olevate hoonete puhul). Seetõttu valitakse vana hoone soojusläbivuse muutmisel seespoolne soojusisolatsioonisüsteem, kuid see muudab hoone välisseina ehitusfüüsikaliselt halvemaks ning tekivad erinevad kahjustused.

Nõukogudeaegsed ja varem ehitatud majade puhul oli levinud kiviseinte ehitamine selliselt, et välis- ja siseseina vahele jäeti õhkvahe, mis tagab õhuliikuvuse ning peaks soojuslähivuselt parem lahendus olema. Reaalsuses toimivad seinte vahele jäetud õhkvahed lõõridena, mis viivad toasoojuse väliskeskkonda. [5]

Alates 1995.aastast on piirdetarinditele hakatud kehtestama soovituslikke soojuslähivuse U-arvu ning pärast seda on hakatud hoonete välispiirdeid tegema soojust paremini hoidvamateks. Kivihooneid võib soojustada ainult väljast poolt, et piirdetarind toimiks ehitusfüüsikaliselt. Soojustuse lisamine välisseina sisemisele poolele tekitab olukorra, kus välisseinas olev niiskus külmub soojustuse taga ning see põhjustab paisudes seinas temperatuurideformatsioone ja vähendab seinu eluiga. Soojustuse lisamisega sisepinnale tekib suurem külmasild kiviseinale toetuva puitvahelaetala ja sisepinna ühenduskoha juures. Lisaks eelnevale langeb kiviseina sisepinna temperatuur soojustuse taga ja seetõttu suureneb seal suhteline niiskus ning on oht hallituse tekkele või veeauru kondenseerumisele. Hallitus võib tekkida nii tarindi pinnal (seespoolse soojusisolatsiooni taga) kui ka tarindi sees (tellismüüritises, kui sein on soojustatud seespoolt) ning ohustatuimad kohad hallituse tekkeks on külmasildade piirkonnad. [6]

Kivist välisseina seespoolse soojusisolatsiooni riskideks lisaks hallituse ja külmakahjustuse tekkele, veeauru kondenseerumise ohule ning külmasildade suurenemisele on, et väheneb hoonetes soojuslik massiivsus ning seinakonstruktsioonis oleva niiskuse välja kuivamine, kiviseinte puidust vahelaetadele suureneb puidumädanike ja muu bioloogilise teguri riski teke. Kiviseina seespoolne soojustamine tuleks eelnevalt läbi analüüsida, kui tarvilik see siiski on ning kui muud võimalust maja soojuslähivuse parandamiseks pole (nt muinsuskaitse all olevad hooned), siis lisasoojustuse paksuse selgitab välja pädev projekteerija, võttes arvesse seinu soojuslähivust, seinu originaallahendust, ümbritsevat sise- ja väliskliimat, seinu ja vahelaet liitumiskohti ning soojustusmaterjali omadusi. [7,8]

Kiviseina seespoolse soojusisolatsioonina on lubatud lisada 1/4 soojustusest veeaurutihedast soojustuskihist sissepoole. Selliselt soojustatud välisseina sisepinna temperatuur ei lange alla küllastustemperatuuri ja väheneb veeauru difusioon, kuid ei paranda seinu soojuslähivust oluliselt. [6]

Muinsuskaitse all oleva Kohtla-Järvel, Spordi tn 2 asuva koolihoone seespoolse lisasoojustamise katses kasutati nelja soojustusmaterjali – polüisotsüanuraatvahtplaat (PIR),

polüüretaanplaat (iQ-T), poorbetoonplaat (AAC), kaltsiumsilikaat (CaSi). Uuringus selgus, et kasutatud soojustusmaterjalid tõstsid soojustatud seina sisepinnal olevat temperatuuri (kõrgeim temperatuurikasv võrreldes soojustamata seinaosaga,  $\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , oli polüüretaanplaadiga soojustatud seinaosas) ja paranes soojuslik mugavus, kuid samas tekkis soojustuse ja seina sisepinna vahele ka hallituse kasvuks sobilikud niiskuse- ja temperatuuritingimused. Soojustamisega suurendati kõikide katseseinaosade soojustakistust, seda vastavalt lahendusele 1,7-... 2,9-kordselt. [8]

Kohtla-Järve koolihoone seespoolse lisasoojustamise katse tulemusena selgus, et ajalooliste hoonete puhul on lisasoojustamiseks sobilikud kõik uuringus kasutusel olnud soojustusmaterjalid. Suurema niiskuskoormusega hoonetes (elamutes) ei ole sobilikuks lahenduseks PIR plaadi kasutamine, kuna ületas katses kriitilise suhtelise niiskuse taset. Kivist eluhoonetes, kus on kõrgem niiskusesisaldus, kasutada aurutihedaid materjale ja katsetatutest parim lahendus on kaltsiumsilikaadiga soojustamine. [7, 8]

Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehnilise seisukorra ja prognoositava eluea uuringu lõppraportis kivivillaga tehtud seespoolse lisasoojustuse katses selgus, et seinas olev suhteline niiskus oli kõrge ja sellest  $\sim 36\%$  ajast oli hallituse tekkeks sobilikud tingimused. Konstruktsiooni avamisel oli kivivilla ja tellisseina vahel sein kaetud veeauru kondensaadiga ja villast võetud proov tõestas seal ka hallituse olemasolu. [9]

Enne 19.sajandi lõppu ehitatud hoonete vahelaed on enamasti puittaladega või paekivi- või tellisvõlvidega. Ka veel sõdade vahelisel ajal ehitati puittaladega vahelagesid mitmekorruselistesse kivimajadesse, kuid üha rohkem hakati ehitama tulekindlaid vahelagesid raudbetoonist. Seespoolse soojusisolatsioonisüsteemiga müüritise puitvahelaetaladel on suurem niiskuskoormus, mis tuleneb müüritise vähenenud kuivamispotentsiaalst ning võib tekitada hallitust ning suurenenud niiskuse tõttu ka mädanikseeni. Kiviseina seespoolse soojusisolatsiooni tõttu on müüritises madalam temperatuur, mille tulemusel on suurem oht niiske siseõhu kondenseerumiseks tala otstes. Lisaks niiskuse kondenseerumisele tala otstes, võib seespoolne soojusisolatsioonisüsteem tekitada ka tala otste lagunemist ja külmakahjustusi, sest talaots on läbi soojustuse viidud ja asub seina külmemal poolel. [6, 15, 16]

## **1.4. Uuringute tulemused kirjanduse põhjal**

### **1.4.1. Avatud talaotsad**

Evy Vereecken ja Staf Roelsi poolt läbiviidud katse Belgias, keskendus puitkarkassivahele paigaldatud kaltsiumsilikaadi, mineraalvilla ja aurutõkke ning vahtpolüsterooliga soojustatud seintele lisaks soojustamata seinale. Katse viidi läbi kliimakambriga, tekitades püsiva talvise olukorra, kus puudub tuulest tingitud vihm. Katses tehti kolm katseseeriat, ühes nendes ei pööratud tähelepanu seinte ja puitalde ühenduskoha õhutihedusele. Mineraalvillaga soojustatud seinal oli suurim soojustakistus, kaltsiumsilikaadiga soojustatud seinal aga madalaim soojustakistus. Soojustatud seinte puitkarkassid toimisid külmasildadena.

Katses selgub, et õhutihedaks tegemata ühenduskohtade puhul on talaotste juures olev suhteline õhuniiskus kõrgem kui õhutihedaks tehtud ühenduskohtadega seinte puhul. Puittalaotste taga mõõdetud niiskusesisaldus oli suurim siis, kui sein oli soojustatud vahtpolüstüreeni (EPS) või kaltsiumsilikaadiga (CaSi). Mineraalvillaga soojustatud seina puhul saavutati madalaim niiskusesisaldus nagu ka õhuniiskuse puhul. [15]

Tšehhi Tehnikaülikoolis viidi läbi väikese vihma ja tuule korral puittalaotste ja seespoolse soojusisolatsioonisüsteemi katse, kus mõõdeti temperatuure, suhtelist niiskust, puidu niiskusesisaldust ning soojusvooge kahe aasta jooksul. Katses kasutati kolme erinevat soojusisolatsioonisüsteemi – puitkiud soojusisolatsioon koos krohviga, mineraalvill koos aurutõkke ja kipsplaadiga ning vaakumisolatsioon koos krohviga. Osade soojusisolatsioonisüsteemiga soojustatud seina talaotsad suleti ehk tehti õhutihedaks, osad jäeti lahtiseks. Katses selgus, et avatud ehk tihendamata talaotste puhul oli suhteline õhuniiskus kõrgem kui õhutihedaks tehtud talaotste puhul ja seda eriti teise aasta puhul, kui suhteline õhuniiskus ja siseõhutemperatuur olid kõrgemad. [16]

Kahe katse tulemustest võib järeldada, et avatud talaotste puhul on õhuniiskus talaotsa juures kõrgem, kui õhutihedaks tehtud talaotste juures. Suurema õhuniiskusega talaotste juures on suurem oht hallituse ja mädanikseente tekkeks. Külmal perioodil avatud talaotstesse kondenseerunud veel on võimalus kuivada välja soojemal perioodil.



#### 1.4.2. Tihendatud talaotsad

Belgias on Evy Vereecken ja Staf Roelsi poolt läbiviidud katse, kus keskenduti erinevate soojusisolatsioonisüsteemidega soojustatud seintele ja soojustamata seinale ning talaotste õhutihedaks tegemisele, kasutades ainult teipi või teip + PUR-vaht. Katse viidi läbi kliimakambris, kus puudub tuulest tingitud vihm ning on tekitatud püsiva talve olukord.

Talade ja seinte ristumiskoht tihendati õhukindla teibi ja PUR-vahuga. Müüritisele asetatud puittala külgedele ja peale jäeti 10 mm õhkvahe, mis annab konvektiivse õhuvoolest tingituna niiskuskahjustuse osas halvima stsenaariumi. Tala ühendati müüritisega mördi abil. Tala ja seina ühenduskoha õhukindlust kontrolliti õhukindla karbiga, millesse loodi järk-järgult tõstetav ülerõhk. [15]

Katses selgub, et õhukindlaks tehtud talaotse puhul oli suhteline õhuniiskus madalam kui avatud talaotsa puhul, kuid kõrgem, kui elastse PUR-i vahuga tihendatud talaotsal. Leiti, et korralikult õhutihedaks tehtud ja täidetud õhulõhedega talad on parim võimalus konvektiivse niiskuse vältimiseks ja suhtelise õhuniiskuse suurenemise piiramiseks. Mineraalvillaga soojustatud ja aurutihedaks (teip + PUR) tehtud seina korral on madalaim suhteline õhuniiskus. Kõige suurem suhtelise õhuniiskuse sisalduse kukkumine oli kaltsiumsilikaadiga soojustatud ja õhutihedaks tehtud teipi ja PUR'i kasutades. Puittalaotsa teibiga õhukindlaks tegemisel selgus, et kaltsiumsilikaadiga (CaSi) soojustatud seinas on niiskusesisaldus suurem. Kõikide seinte ja talaotste õhutihedaks tegemisel oli näha sarnasust, et kui talaotsa oli tehtud õhukindlaks kasutades teipi ja PUR-i, siis nende niiskusesisaldus oli talaotstes väiksem kui ainult teipi kasutades. [15]

Kui puittala otsa ümber oli õhkvahe, siis sisemine konvektiivne õhuvool võib liikuda külmemasse piirkonda, kus jahtub ning põhjustab suurema suhtelise õhuniiskuse. Kui puittala ots tihendati PUR-iga ja seetõttu välditi sisemist õhuvoolu, oli talaotsa lähedal palju madalam suhteline õhuniiskus. EPS-iga soojustatud seina puhul täheldati sarnast käitumist. Mineraalvilla ja aurutõkkega soojustatud seinas on väike konvektiivse õhuvoolu oht. Lisaks on talaotsa ja seina ühenduskoha õhutiheda tihendi mõju väiksem kui teiste soojustusmaterjalidega soojustatud sein. Seda võib põhjustada pehmem isolatsioonimaterjal, tänu millele on parem kontakt talaga. [15]

Tšehhi Tehnikaülikoolis läbiviidud katses, kus oli kasutatud seespoolseks soojusisolatsiooniks puitkiud soojusisolatsiooni koos krohviga, mineraalvill koos aurutõkkega ja kipsplaadiga ning vaakumisolatsioon koos krohviga, olid mõned talaotsad tehtud õhutihedaks, kasutades teipi või PUR-vahtu. Tihendatud talaotste puhul täheldati, et suhtelise õhuniiskuse aastane amplituut oli oluliselt madalam ja ühtlasem kui avatud talaotste puhul. Kunstlikul tekitatud vihmakatses selgus samuti, et tihendatud ühenduskohaga talapesade suhteline õhuniiskus tõusis aeglasemalt kui tihendamata talaotste puhul. Õhu- ja veeaurutihedaks tehtud talaotsa ja seina ühenduskoht vähendab veeauru difusioonilist ja konvektiivset liikumist eluruumist talapesadesse. Oluline on, et talade ja seina ühenduskohad oleks tehtud korralikult õhutihedaks, sealjuures ka talade kuivamisest tekkinud praod. Talaotste õhu- ja veeaurutihedaks tegemisega paranes puittalaotste mikrokliima. [22]

Seega talaotste õhu- ja veeaurutihedaks tegemine parandab, kuid mitte olulisel määral, talaotste juures olevat suhtelise õhuniiskuse kogust. Väiksema niiskusesisaldusega talaotsa juures väheneb hallituse ja mädanikseente tekke risk.

#### **1.4.3. Vaskplaatidega temperatuuri hoidmine talaotstes**

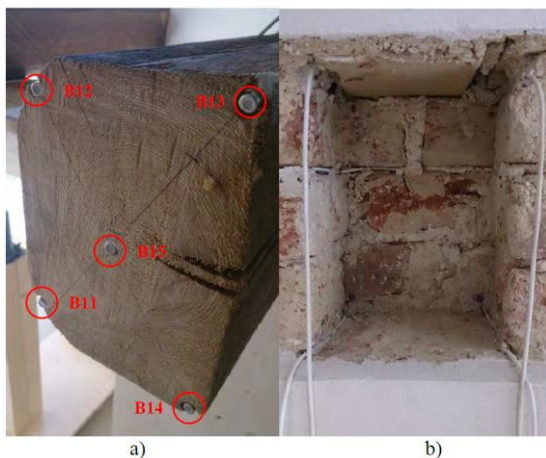
Austrias on Paul Wegerer ja Thomas Bednar viinud läbi soojuste ja niiskuse liikumise simulatsioone hoone tarindites uurimaks, kuidas seespoolne soojusisolatsioon mõjub vahelaepuittaladele. See uuring on andnud neile kinnitust, et seespoolse soojusisolatsiooni paigaldamisega tuleb talaotstele rakendada meetmeid, mis aitaksid vältida olukorda, kus talaotste juures olev õhk jahtub ning tekib kondensaat. Sellist olukorda aitab vältida talaotste ajutine soojendamine vaskplaatidega.

Nad on välja töötanud, Viinis asuvas *The Research Center for Building Physics and Sound Protection* uurimiskeskuses, prototüübi puittalaotste karastamiseks. Idee seisneb selles, et tala otstesse paigaldatakse soojust juhtivad vaskplaadid (vt. Joonis 9), mis siis hoiavad talaotsa juures oleva temperatuuri kõrgemana ja sellega on võimalik vältida kondensaadi teket ning sellega omakorda puidu mädanemist. [13]



**Joonis 9.** Soojust juhtiva vaskplaadi prototüüp [13].

Talaotste karastamise kolmeetapiline katse viidi läbi kliimakambris (välitemperatuur  $-10^{\circ}\text{C}$  ja sisetemperatuur  $+22^{\circ}\text{C}$ ) 45 cm paksuse tellisseinaga. Talaotstesse paigaldati temperatuuri- ja niiskusandurid, talapesadesse paigaldati pinnatemperatuuriandurid (vt. Joonis 10) ning müüritisse endasse andurid soojuse ja niiskuse käitumise uurimiseks. Müüritise pinnale paigaldati temperatuuri ja õhuvoolu mõõtekiled soojustakistuse andmete kogumiseks. [13]



**Joonis 10.** Andurite paigutus – a) talapea otsas, b) talapea pesas [13].

Esimeses etapis tehti mõõtmised ilma seespoolse soojusisolatsioonisüsteemi ja laeta. Teises etapis katsetati vahelaega ning paigaldati seinale sisepinnale 5 cm paksune soojusisolatsioonikiht. Kolmandas etapis lisati lisaks eelnevale talaotstesse, talapea ja müüritise vahele õhkvahele, vasest metallplaadid kütetorudega (vt. Joonis 11) . Talapea välimisse otsa lisati temperatuuriandur. Lisaks kolmeetapilisele katsele tehti katsetele ka identsed soojuse ja niiskuse levimise simulatsioonid programmidega *Comsol Multiphysics* ja *HAM4D\_VIE*. [13]



**Joonis 11.** Soojust juhtivad vaskplaadid koos vasest küttetorudega (vaade alt) [13].

Uuring näitas, et vaskplaatide kasutamisega talaotstes ja seespoolse soojusisolatsiooni lisamisega seinale alanes talaotsa juures olev temperatuur, võrreldes soojustamata seinaga ja talaotstesse lisatavate vaskplaatidega. Vaskplaadid küttetoruga aitasid hoida talapea juures olevat temperatuuri soojemana kui soojustamata katseseina puhul. [13]

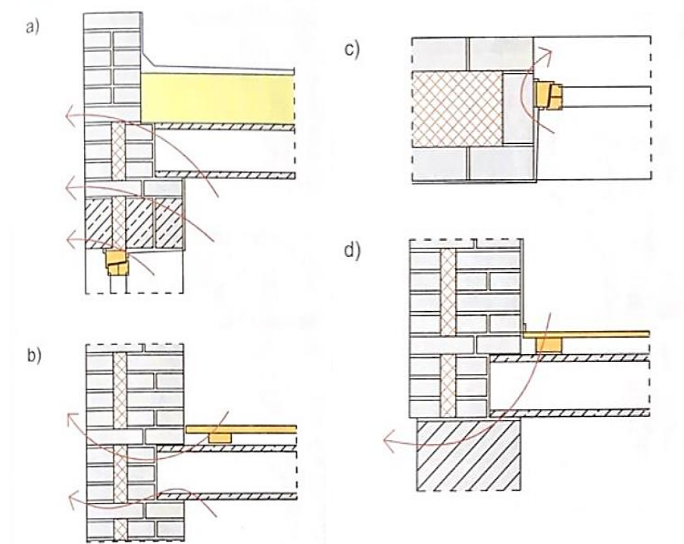
Antud prototüüp ja katsed vajavad küll veel täiendamist, kuid juba esialgsed tulemused on andnud piisavalt head tagasisidet. Sellest saaks järeldada, et see oleks üks moodus, kuidas ära hoida talapea juures temperatuurilangemise ja õhu niiskussisalduse kasvu ning sellega seoses hallituse ja mädanikseente tekke.

## 1.5. Külmasillad

Külmasild on piirkond tarindis, kus soojusläbivus on palju suurem kui muudes tarindi osades. Külmasillad põhjustavad suurt soojuskadu. Tarindis, kus esineb külmasildu, on tarindi sisepinnal olev temperatuur madalam ja välispinnal suurem kui muudel sama pinna kohtadel. Temperatuuride erinevus võib olla lausa mitu kraadi ja see toob endaga kaasa niiskuse kondenseerumise ohu ja hallituse tekke võimaluse. [6]

Külmasildasid eristatakse geomeetrilisteks, ehituskonstruksioonilisteks, punkt-, joon- ja kohtkülmasildadeks. Geomeetrilised külmasillad on näiteks välisseina ja vahelae toetuskoht (vt. Joonis 12b), välisseina välisnurk, akna liitekoht välisseinaga (vt. Joonis 12c) või ka tarindi paksusest tulenev lokaalne muutus. Ehituskonstruksiooniline külmasild on tarindite

liitekohtades, igasugused läbiviigud tarindis või soojustuses. Punktkülmasillad on soojustuse liitekohtades või soojustuse kinnitamiseks kasutatud kinnitite läbiviikudes. Joonkülmasillad on soojustatud telliskiviseinas tellis- ja mörtdiafragmad, vahelae toetuskoht müüritise peal, hoonete välisnurgad jne. Kohtkülmasillad on ehitistes sillused tellisseintes, soojustusest läbiminevad tarindid jms. [6, 14]



**Joonis 12.** Nõukogudeaegsete tellishoonete külmasillad. a) külmasild parapeti juures, b) külmasild vahelae toetumiskohas, c) külmasild akna ja seina ühenduskohas, d) külmasild sokli juures. [6]

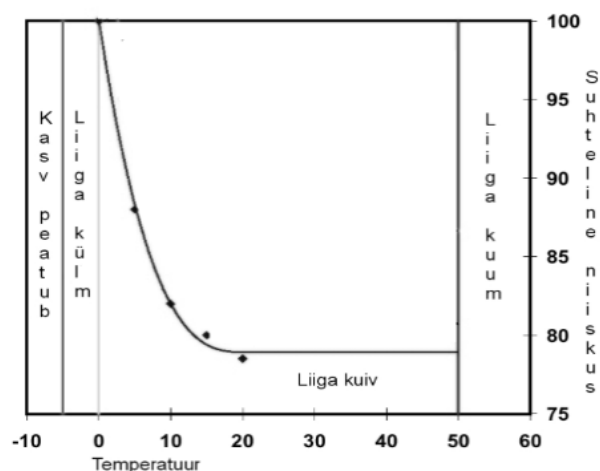
Külmasildade asukohta saab hinnata temperatuuriväljade arvutusmeetodiga kui ka termovisiooni infrapunakaameraga mõõtes antud hetke pinnatemperatuuri. Lisaks neile on võimalik külmasildasid märgata ka visuaalsel vaatlusel – viimistluse muutuse või hallituse järgi. [6, 14]

Külmasilla kriitilisust saab hinnata temperatuuriindeksi  $f_{Rsi}$  abil. Temperatuuriindeksi leidmiseks on vaja teada tarindi sisepinnatemperatuuri, välis- ja siseõhutemperatuuri. Selle indeksi piirsuuruse kriitilisust määravad välis- ja sisekliima, niiskuskooormused, ehitise kasutustingimused, ehitises kasutatud ehitismaterjalid. Temperatuuriindeks määrab ära niiskuse kondenseerumise ja hallituse tekke ohu. [6, 9]

## 1.6. Hallitus

Hallitus ehk hallitusseened on seeneniidistikku moodustavad mikroskoopilised seened, mille viljakehad pole silmale nähtavad. Hallitusseened on looduskeskkonna loomulik osa, võime leida neid mullas, vees, sise- ja välisõhus, organismis jne. [17]

Hallitusseened ei mõjuta hoone ehituslikku tugevust, kuid mõjutavad oluliselt inimeste tervist, tootes ohtlikke mükotoksiine ja tugevad allergeene. Hallitusseened, mis leiduvad eluruumides, vajavad oma elutegevuseks keskkonda, kus on piisavalt orgaanilisi aineid, temperatuur 25-28°C, kestev õhuniiskus üle 70% ja materjali niiskussisaldus üle 35%. Soojemates ja niiskemates ruumides arenevad hallituste kolooniad kiiremini (vt. Joonis 13). Hallitusseene kolooniate peamised kasvukohad on aknapaale, keldrid, niiskete ruumide ripplagede tagune, köök, lae ja seina välisnurgad, külmasildade vahetuslähedus jne. [17, 18, 19]



**Joonis 13.** Soodsad keskkonnatingimused hallituse kasvuks [33].

Lisaks sobilikule elukeskkonnale on hallituse tekke arenguga seotud ka ehituses kasutatud ehitusmaterjalid. Mineraalvillal on suur õhu läbilaskvus ja seetõttu on võimalik niiskel õhul kiirelt villa sisse tungida. Niiske õhu villast eemale hoidmiseks tuleks kasutada aurutõket. Tänapäevastes mineraalvillades on hallitusseente kolooniate tekke võimalus madal (kuid siiski olemas, nagu selgus eelpool väljatoodud uuringus), sest neis on orgaanilise aine sisaldus väike. Ilma aurutõkketa ja valesti kasutatud mineraalvillas on hallituse tekke

võimalus olemas, seda eriti pikas perspektiivis, kui niiskusega on villa sisse juhitud orgaanilised ühendid ja tolmuosakesed. Puidus, mis muidu on poorne ja hügrokoopne materjal, täis orgaanilist ainet, on hallitusseenel raske areneda. Hallitusseened saavad puidus hakata alles siis arenema, kui puidu rakuseinad ja poorid on veest küllastunud ning niiskusesisaldus üle 35%. Hallitusseente arenguks töödeldud puidul mängivad rolli puidu pinnakattevahendite omadused. [20]

Hallitusseente teket on võimalik ennetada. Selleks tuleks hoida pinnad toitainetevabad ja kuivad, hoida eluruumide õhuniiskust vahemikus 35-60% ja temperatuuri 20-22°C ning kasutada sobilikke ehitusmaterjale. Hallitusseente kolooniate avastamisel, tuleks hallitusega kaetud pinnad võimalikult kiiresti puhastada niiske lapiga. Ulatuslike kolooniate eemaldamiseks ja ruumide siseõhu puhastamiseks soovitatakse kasutada desinfitseerivaid aineid, kuid tuleb pidada meeles, et need ei taga jäädavat kaitset. Hallitusseeni ja peamiselt seeneniidistikku on võimalik ka surmata otsese päikese UV-kiirgusega. [18, 21]

## **1.7. Niiskus ehitustarindis**

Niiskus võib sattuda ehitustarindisse loomuliku elutegevuse käigus tekkinud niiskuskoormusest, halvast ventilatsioonist ning ehituslikest vigadest (nt niiskete ehitusmaterjalide kasutamisest). Niiskuse kondenseerumine piirdetarindisse toob endaga kaasa probleeme, nt on suur oht piirdetarindis külmakahjustuste ja hallitusseente tekkeks. [51]

Niiskus võib kondenseeruda piirdesse kui ruum on kütmata ja toimub välitemperatuuri oluline tõus, läbiviikude kaudu tarindis, ruumis kus temperatuur langeb, aga õhuniiskus jääb samaks ja ka külmasildade kaudu. Veeaur liigub väljastpoolt sissepoole ning veeauruhulka, mis piirdesse kondenseerub, ei ole nähtav, kuid nähtav on niiskusest tekkinud kahjustused (puidus mädanik, metallil korrosioon jms). [51]

Veeaur kondenseerub piirdesse kui tegelik veeauru osarõhk ületab maksimaalse veeauru osarõhu piirdes. Niiskus liigub suurema aurusisaldusega õhust kuivema õhu suunas, üldjuhul ruumist välja. On olukordi, kus õhuniiskus ei saa liikuda ruumist välja, sest hoone välissein on liiga aurutihe ja sellisel juhul jääb niiskus kondenseerunud kujul ehitustarindisse.

Veeauru kondenseerumist saab vältida hea ventilatsioonisüsteemiga, korralikult ehitatud õhkvahe ja aurutõkkega välispiirde sisemises pinnas, ruumide ventileerimine jaheda õhuga. [51]

Veeaur liigub difusiooni, konvektsiooni või kapillaarse imendumise teel. Difuusne liikumine on, kui niiskus liigub suuremalt rõhu poolelt väiksema osarõhu poole. Selline liikumine on seotud materjali poorsusega – mida poorsem, seda rohkem liigub niiskust läbi materjali. Konvektsiooni teel liiguvad veeosakesed õhuvooluga kaasa ning tänu sellele on niiskuse liikumine suurem ja kiirem kui difusiooni puhul. Kapillaarne veeauru liikumine toimub materjali poorides kapillaarjõu ja pindpinevuse kaudu. [51]

## **1.8. Polüuretaan- ehk PUR-vaht**

1930ndate aastate lõpus töötati välja Saksamaal teadlase Otto Bayeri poolt polüuretaanvaht, et leida alternatiiv kummimaterjalile. Bayeri poolt algselt loodud vahust arenes välja tänapäeval tuntud PUR-vaht 1980ndatel. Kogu maailmas kasvas PUR-vahust teadlikkus alles alates 1990.aastast tänu infoajastule ja see andis PUR-vahtu tööstusele suure kasvu. [46]

Polüuretaanvaht ehk PUR-vaht on masinaga pritsitav kahekomponentne vaht. PUR-vaht ei sisalda formaldehüüde, lendlevaid osakesi ega mürgiseid gaase (mis vahu pritsides küll eralduvad, kuid vahu tahenedes enam mitte), seega allergikutele ei kujuta ohtu ning on elamiseks tervislik keskkond. Polüuretaanvaht on neutraalne ehk seal ei teki seenkahjustusi ega hallitust ning ei meeldi vaht kahjuritele ja närilistele. [47]

Polüuretaanvahtu kasutatakse uute kui ka renoveerimist vajavate majade vundamentide, puitkarkassseinte, katuste jms soojustamiseks ning ka tühimike täitmiseks ja läbiviikude tihendamiseks. Lisaks soojustamisele kasutatakse vahtu ka külmade ruumide kaitseks soojuse eest - seda näiteks keldrite, külmhoonete puhul. Vaht nakkub peaaegu iga materjaliga, eriti hästi nakkub betooni, puidu, pleki, plastiku jm ehitusmaterjaliga. [47]

Vahtu on nii suletud kui ka avatud pooridega. Suletud pooriga PUR vahtu kasutades ei ole vaja lisaks kasutada tuule- ega aurutõket kuna 96 % vahuosakestest on suletud



rakustruktuuriga ning ei lase läbi õhku ega veeauru. Suletud pooriga vaht on peaaegu kaks korda soojust hoidvam kui mistahes muu soojustusmaterjal ning sellevõrra on soojustuskihi paksus poole väiksem. Avatud pooridega polüuretaanvahu poorid ei ole täielikult suletud ning soojusläbivuselt on avatud pooridega vaht võrdne mineraalvillaga. Avatud pooridega PUR-vaht laseb veeaurul liikuda, kuid ei ima seda endasse ning vajab lisaks ka auru- ja tuuletõket. Tänu oma pehmele ja õhulisele struktuurile on avatud pooridega vaht väga hea heliisolatsioonimaterjal. [47]

PUR-vahu eeliseks teiste soojustusmaterjalide ees on tema kiire paigaldus, püsib ajas samasugune ning ei kaota oma algset kuju. Vahtu on võimalik lakke paigaldada ilma lisaliistudeta ning vaht püsib omal kohal. Vahuga saab täita erinevaid pragusid/vahesid (nt puidu kuivamisest tekkivad praod), mida teiste isolatsioonimaterjalidega täita pole võimalik, sest vaht paisub pärast paigaldust ning tungib igasse võimalikku avausse, mis ette jääb. [47]

## **1.9. Kivivill**

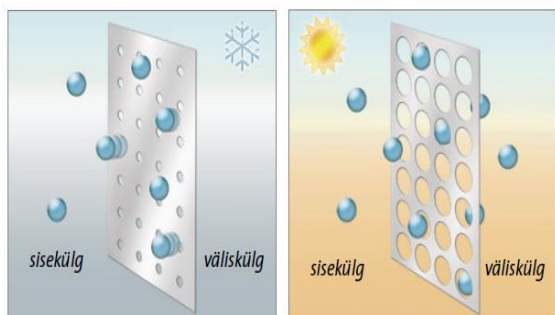
Kivivilla toodetakse tänapäeval tehastes mineraalkiust, milles leidub 95,5 – 99,5 % amorfseid silikaate ja ülejäänud osa orgaanilist sideainesegu (fenoolformaldehüüdvaigu vesiemulsiooni). Villaplaadi toorained ränidioksiid, alumiiniumoksiid, raudoksiid, kaltsium- ja magneesiumoksiidid, naatrium- ja kaaliumoksiidid ning koks valatakse sulatusahju. Sulatusahjust voolab välja sulam, mis suunatakse ketrusmasinale. Ketrusmasinal moodustatakse kiud. Seejärel lisatakse sideained ja mineraalõli ja kogutakse kiud lintkonveierile. [24]

Kivivilla tootmisstruktuuri ja kiutihedust reguleeritakse senikaua kuni liigub edasi tahenemiskambrisse tahenema. Pärast tahenemist lõigatakse vill tükkideks ja sobivuse puhul pakitakse. Kui avastatakse, et tahenenud kivivill ei vasta kriteeriumitele, suunatakse see täiendavaks töötlemiseks edasi. Tootmisprotsessis tekkinud jäätmed suunatakse edasi ümbertöötlemisele. [24]

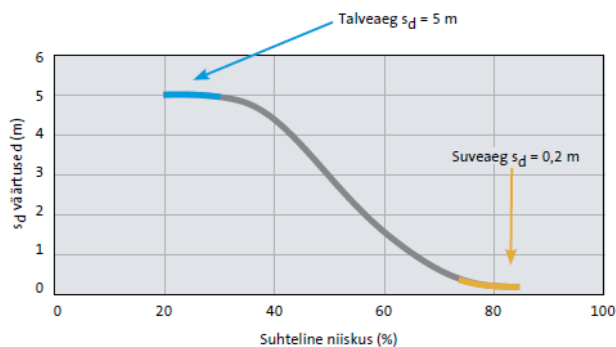
## 1.10. Intelligentne aurutõke

Seespoolse soojusisolatsiooniga välisseina puhul tuleb aurutõke paigaldada välisseina sisemisele pinnale võimalikult lähedale, vastasel juhul soojustus märgub ning saab kahjustada. Intelligentne aurutõke VARIO KM Duplex UV on kuivamisvõimega polüfunktsionaalne toode, mis tagab aurutõkkele õigesti ja kvaliteetse paigaldamise korral õhutiheduse ja kaitseb niiskuse eest. Aurutõkkele on valmistatud polüamiidist, olles samal ajal ka lõhnu peatav, keskkonnasõbralik ja taaskasutatav toode. [54]

VARIO KM Duplex UV aurutõkkele kohaneb erinevate temperatuuri ja õhuniiskuse muutustega. Talvel madala temperatuuri ja õhuniiskusega VARIO aurutõkkele molekulid kahanevad (vt. Joonis 14) ja peatavad niiskuse liikumise difusiooni teel hoone ruumidest selle konstruktsioonidesse. Suvel kõrge temperatuuri ja õhuniiskuse juures aurutõkkele molekulid suurenevad (vt. Joonis 14) ning konstruktsioonidesse pääsenud niiskus saab eemalduda kuivades ruumi sisse ja sellega vältides konstruktsiooni kahjustumist. Aurutõkkele difusioonitakistus  $s_d$  oleneb vastavalt suhtelisele õhuniiskusele (vt. Joonis 15). [54]



**Joonis 14.** VARIO KM Duplex UV aurutõkkele molekulid talvel (vasakul) ja suvel (paremal). [54]



**Joonis 15.** VARIO KM Duplex UV aurutõkkele difusioonitakistus. [54]

## 2. MÕÕTMISMETOODIKA JA KATSETAMINE

### 2.1. Katsete eesmärk

Katsete eesmärk on uurida, kuidas mõjutab seespoolne soojusisolatsioon vahelae talade juures olevat suhtelist õhuniiskust ja temperatuuri. Mõõdetud andmeid (RH ja temperatuur) võrreldakse simulatsiooniprogrammiga THERM ja Delphin.

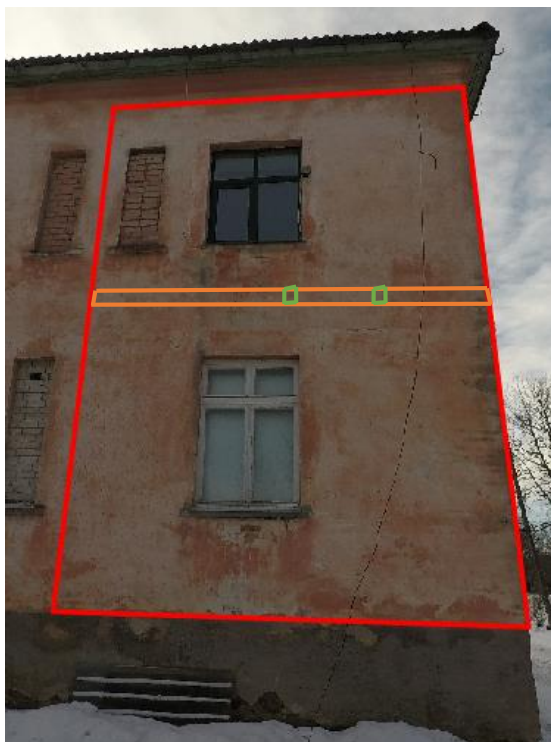
### 2.2. Katseobjekti asukoht ja kirjeldus

Katseobjektide asukoht on toodud Maa-ameti kaardil (vt. Joonis 16), kus roheline viirutus tähistab korterite asukohta ning punane joon katseseina paiknemist.



Joonis 16. Mõisaringi 1 asukohaskeem [23].

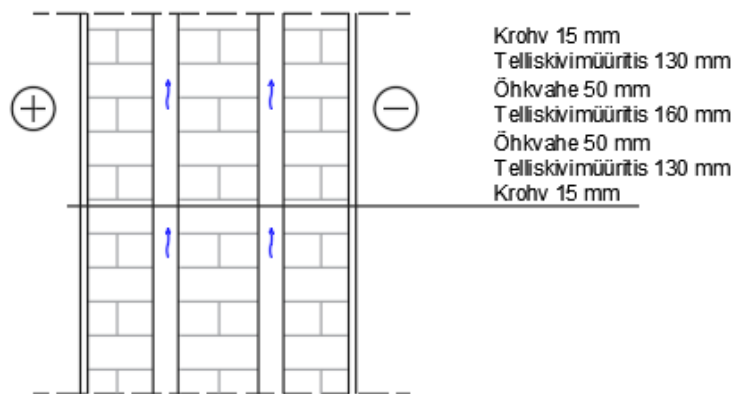
Katse on läbiviidud Vasula alevikus, Mõisaringi 1 kortermajas. Kortermaja on ehitatud II maailmasõja ajal kunagise mõisaaegse valitsejamaja kohale ning valminud 1943.aastal. Esimesed renoveerimistööd on teostatud juba aastal 1945. Katseobjektiks on tellisseina, puitvahelae taladega ja seespoolse soojusisolatsioonisüsteemiga hoone põhjapoolsem külgsein (vt. Joonis 17).



**Joonis 17.** Katseseina (punane kast), katsevahelae (oranž kast) ja katses vaadeldavate talade (rohelised kastid) asukohad fassaadil.

Kuna katseseinad on põhjapoolsemal küljel, siis otsest päikesevalgust seintele ei paista. Hoone on krohvitud, kuid osaliselt on krohv maha kukkunud ja tellised avatud vihmale ning tuultele. Krohvis olulisi pragunemisi pole. I korruse ruumi kütab puuküttega pliit ning soojuspump, mille siseosa asub katses käsitletavas seinas. II korruse ruumi kütteks on puuküttega ahi.

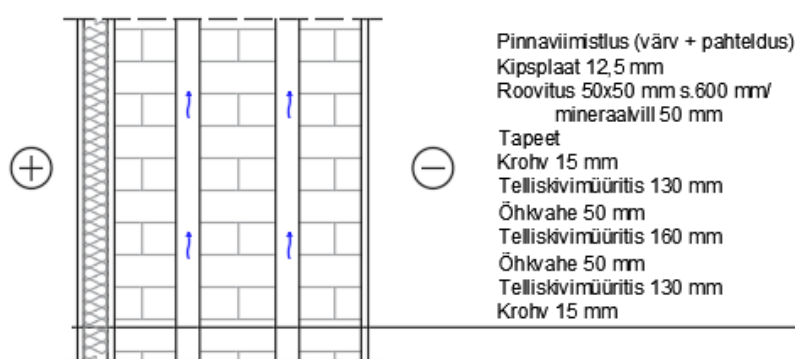
Seespoolse soojusisolatsioonita olemasoleva välisseina kihtide paksused tehti kindlaks mõõdulindiga mõõtmisega puurimise ajal. Välisseina VS-1 ristlõige on esitatud joonisel 18.



**Joonis 18.** Olemasoleva välisseina VS-1 ristlõige.

Olemasoleva välisseina VS-1 asub kortermaja II korrusel. Sein koosneb seestpoolt väljapoole liikudes 15 mm paksusest krohvikihist, 130 mm laiustest savitellistest, 50 mm paksusest õhkvahest, 160 mm laiustest savitellistest, 50 mm paksusest õhkvahest, 130 mm laiustest savitellistest ning 15 mm paksusest krohvikihist.

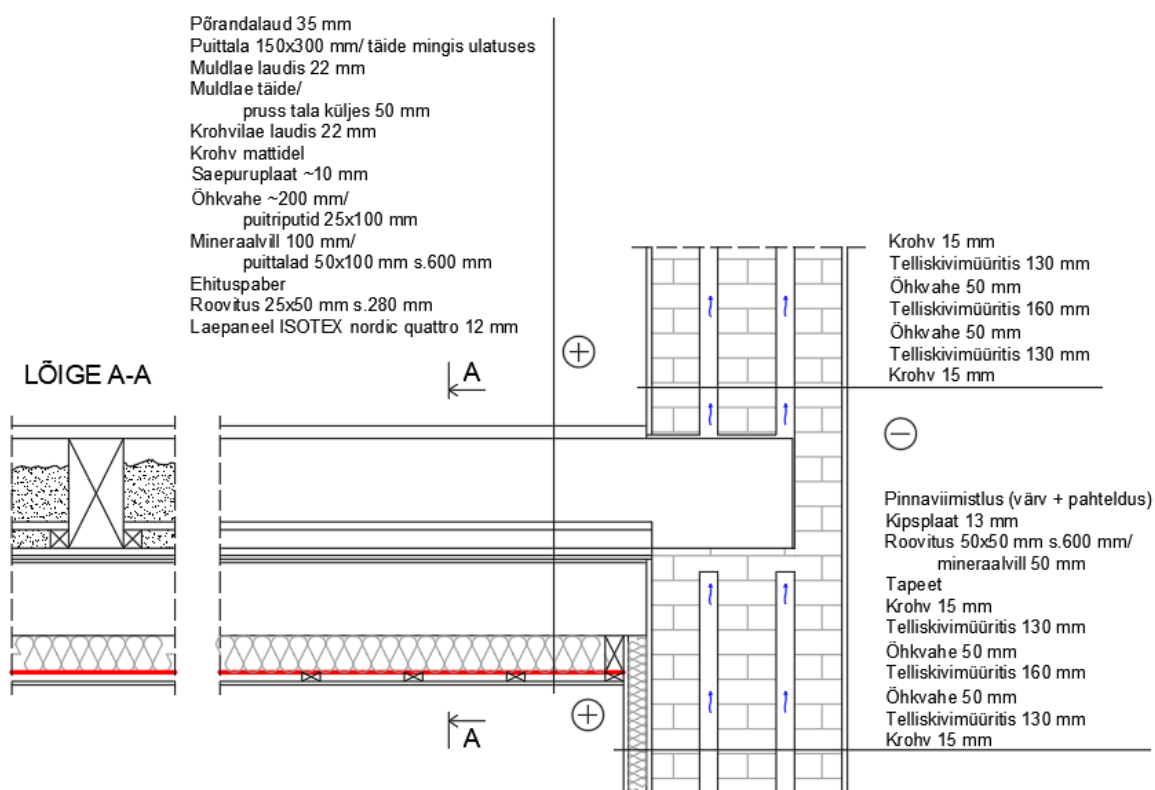
Olemasoleva välisseina VS-2 (vt. seina ristlõiget Joonis 19) asub kortermaja I korrusel. Sein koosneb seestpoolt väljapoole liikudes viimistluskihist (värv + pahteldus), 12,5 mm paksusest kipsplaadist, 50 mm paksusest mineraalvilla kihist, 15 mm paksusest krohvikihist, 130 mm laiustest savitellistest, 50 mm paksusest õhkvahest, 160 mm laiustest savitellistest, 50 mm paksusest õhkvahest, 130 mm laiustest savitellistest ning 15 mm paksusest krohvikihist.



**Joonis 19.** Olemasoleva välisseina VS-2 ristlõige.

Olemasoleva vahelae VL-1 (vt. vahelae ristlõiget Joonis 20) asub kortermaja I ja II korruste vahel. Vahelagi koosneb ülevalt poolt allapoole liikudes 35 mm paksusest põrandalauast, 300 mm paksusest vahelae puittaladest, 22 mm paksusest muldlae laudisest, 50 mm

paksusest muldlae täitest/pruss tala küljes, 22 mm paksusest krohvilae laudisest, krohvimatist, 10 mm krohvikihist, ~10 mm saepuruplaadist, ~200 mm paksusest õhkvahest/puitriputid, 100 mm mineraalvilla kihist/puittala 50x100 mm, ehituspaberist, 25 mm paksusest puitroovitusest, 12 mm paksusest laepaneelist.



**Joonis 20.** Olemasoleva vahelae VL-1 ristlõige.

## 2.3. Kasutatud ehitusmaterjalid

I korruse välisseina soojustamiseks kasutati Rockwooli SUPERROCK pooljäika 50 mm kivivillaplaati.

Kivivilla tehnilised näitajad on järgmised [25]:

- soojuserijuhtivus  $\lambda = 0,035 \text{ W/m} \cdot \text{K};$
- pikaajaline veeimavus  $\leq 3,0 \text{ kg/m}^2;$
- lühiaajaline veeimavus  $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2;$
- veeauru difusioonitakistustegur  $\mu = 1.$

Kivivill kaeti Gyproc GN13 kipsplaadiga. Kipsplaadi tootmiseks vajatakse kipsi, kartongi ja vett, kuid plaate saab toota ka kipstoodete ülejäägist – s.o. taaskasutada. Gyproci kipsplaatide kipsisegu koosneb looduslikust kipsikivist, tööstuslikust kipsist ja taaskasutusse suunatud kipsplaatide kipsist. Kipsplaadi veeauru difusioonitakistustegur  $\mu = 10$  ning soojusläbivus  $\lambda = 0,25 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . [28, 29]

Vahelae katteks on kasutatud 12 mm paksuseid laepaneele ISOTEX Quatro Nordic. Laepaneelide tootmisel on kasutatud looduslikke materjale, mistõttu sobivad paneelid kasutamiseks ka allergikute kodudes. Paneelid on soojust hoidvad ning helisummutavate omadustega, poorne struktuur parandab ruumi akustikat. Laepaneelide soojusläbivustegur on  $\lambda = 0,049 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , helineelduvustegur  $\alpha_w \geq 0,1$  ning veeauru difusioonitakistus  $\mu = 5$ . [26, 27]

## 2.4. Katsevahelae ehitus

Katsevahelae ehitus ja I korruse välisseina seespoolne soojustamine toimus mitmes etapis, ajavahemikul 23.12.2019 – 31.03.2020. Kõigepealt võeti ette välisseina soojustamise (vt. Joonis 21) ja viimistlemise tööd. Välissein soojustati 50 mm paksuse kivivillaga, kaeti kipsplaadiga, tehti täispahteldus ning viimistleti sileda värviga.



**Joonis 21.** I korruse välisseina soojustamine seespidiselt.

Katsevahelae ehitamisel (vt. Joonis 22) paigaldati kõigepealt karkass sobilikku kõrguse peale, lisati järk-järgult ehituspaber, 25 mm roovitus ja 100 mm kivivill. Ehituspaber

kinnitati laekarkassi külge klambritega ning järgmine paan ehituspaberit pandi eelmise peale ülekattega ning ülekate teibiti. Vahelagi viimistleti Isotex Quattro Nordic puitkiust laeplaadiga.



**Joonis 22.** Vahelae ehitamine.

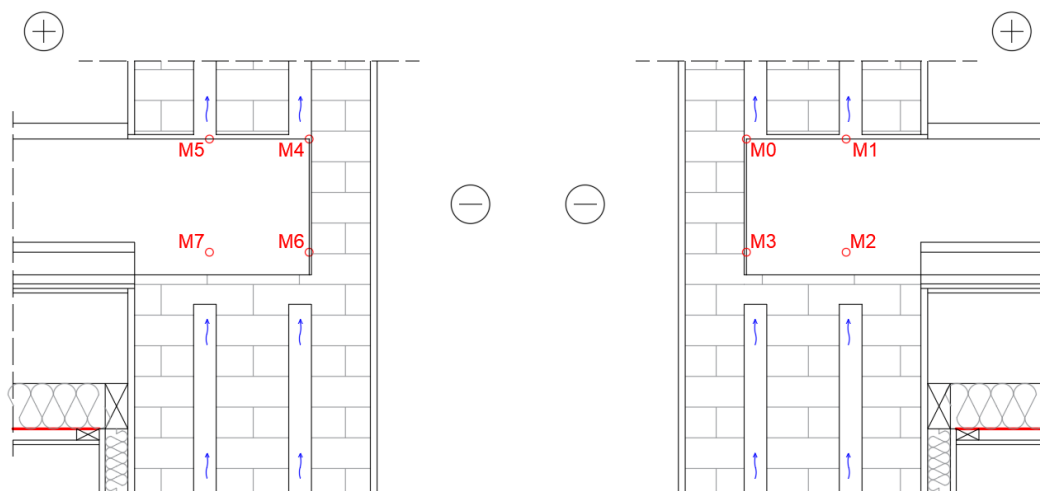
Selline vahelagi peaks laskma niiskusel paremini välja kuivada välisseina soojustuse vahel, kui ilma õhkvaheta laekonstruktsioon.

## **2.5. Andurite paigaldus**

Vahelaetaladele paigaldati kokku 8 temperatuuri- ja niiskusandurit, lisaks II korrusele paigaldati ruumi temperatuuri ja suhtelist õhuniiskust jälgima. Ruumi temperatuuri ja suhtelist õhuniiskuse andurid lisati ka I korruse korterisse lae alla ning kapi peale.

Katses on vaadeldavad 2 tala, ühe tala ots ümbrus on rohkem avatud kui teine. Ühele talale paigaldati kokku 4 andurit - tala ülaserava 2 andurit ja alaserava 2 andurit (vt. andurite asukohti Joonis 23).





**Joonis 23.** Andurite asukohad. Andurid tala paremal küljel (vasakpoolne joonis), andurid tala vasakul küljel (parempoolne joonis).

Pärast andurite paigaldust pandi tagasi põrandalauad ning kõik võimalikud õhuvahed lasti täis vahtu (vt. Joonis 24).



**Joonis 24.** Pärast andurite paigaldust.

## 2.6. Katseseadmed

### 2.6.1. Alhborn Almemo 2890-9 andmesalvesti

Alhborn Almemo andmesalvesti (vt. Joonis 25) on mitme väljundiga – nt mõõdab korraga temperatuuri ja suhtelist õhuniiskust. Andmesalvestil on võimalik valida 50 erineva

funktsiooni vahel. Korraga on võimalik andmesalvesti külge ühendada kuni 9 andurit ning kõigil on sama ülesanne ja intervall, mille järel andmeid salvestatakse. Mõõdetud andmeid on võimalik esitada graafiliselt, joon- või tulpdiagrammina või arvuliselt. Suurel ekraanil on võimalik reaajas jälgida andurite maksimum ja miinimum väärtuseid, salvestusruumi jääkmahtu, aega jpm. [30]

Antud magistritöö katsetulemused on mõõdetud ajavahemikul 13.11.2020 – 15.03.2021 ning on esitatud lisas 1.



**Joonis 25.** Ahlborn Almemo 2890-9 andmesalvesti.

### 2.6.2. Ahlborn FHA 646 R sensorid

Ahlborn Almemo andmesalvesti külge oli ühendatud 8 temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse sensorit. Kasutatud sensorid olid Ahlborn FHA 646 R NTC N tüüpi sensorid (vt. Joonis 26). Sensorid on kompaktsed, väikeste mõõtmetega (50 mm pikkusega ja läbimõõduga 5 mm) ning seega sobivad need eriti hästi kasutamiseks ehituses. Sensoreid saab panna erinevate kihtide vahele seintes ja lagedes/põrandates, et mõõta nendes piirkondades temperatuuri ja suhtelist õhuniiskust. Andurite töövahemik on -30 °C kuni +100 °C (mõõteviga

kuni  $\pm 0,6$  °C, olenevalt temperatuurist) ning suhteline õhuniiskus vahemikus 5-98 % (mõõteviga  $\pm 2$  %, kui RH <90 %). [31]



**Joonis 26.** Ahlborn FHA 646 R NTC N tüüpi sensor [31].

Ahlborn FHA 646 R andurid olid antud magistritöö raames paigaldatud vahelae puittalade külgedele, et mõõta talade ümbruses olevat temperatuuri ja suhtelist õhuniiskust ning seekaudu hinnata riski hallituse ja kondensatsiooni tekkele.

### 2.6.3. Onset HOB0 U12-011 andmesalvesti

HOB0 U12 andmesalvesti (vt. Joonis 27) on 2 kanaliga – temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse täpseks jälgimiseks. Andmesalvesti mõõtepiirkond on -20 °C kuni + 70 °C (mõõteviga  $\pm 0.35$  °C, kuni 50 °C temperatuuri juures) ja suhteline õhuniiskus 5 % kuni 95 % (mõõteviga tavaliselt  $\pm 2,5$  %). Andmeid saab salvestama panna iga 1 sekundi kuni 18 tunni järel, vastavalt soovile. [32]



**Joonis 27.** Onset HOB0 U12-011 andmesalvesti [32].

### 3. METOODIKA

#### 3.1. Kastepunkti ehk Glaseri meetod

Tarindis oleva niiskuse ja temperatuuri mõju hindamiseks kasutatakse kastepunkti ehk Glaseri meetodit, mida kirjeldatakse standardis EVS-EN ISO 13788:2012. Kastepunkti meetodiga on võimalik hinnata tarindis oleva soojuse ja niiskuse olukorda ning vastavalt sellele ka projekteerida õige lahendus, et andmed ei ületaks kriitilist piiri. Antud meetod aga ei anna täpseid tulemusi, et hinnata tarindis olevat niiskusseisundit tema kasutustingimustes. [33]

Kastepunkti meetodit kasutades ei saa luua reaalselt olukorda, kus temperatuur ja õhuniiskus oleks pidevas muutuses. Meetodiga saab anda hinnangu, kasutades konstantseid väärtuseid (temperatuur, õhuniiskus) piirtingimusteks. Glaseri meetod ei arvesta materjali hügroskoopsusega ega keskkonnatingimustest sõltuvaid materjali omadusi. [33]

Kasutades sise- ja välistemperatuuri, ääritingimusi ja materjalide soojuserijuhtivust, leitakse Glaseri meetodiga soojusläbivus piirdetarindis (valemid 1-4). Vastavalt saadud temperatuuridele materjali piirpindadel, leitakse nendele pindadele veeauru küllastusrõhud ning iga tarindikihi veeauru osarõhud (valemid 5-10).

Materjalikihi soojustakistuse leidmiseks kasutatakse valemit [34]

$$R = \frac{d}{\lambda}, \quad (1)$$

kus  $R$  – soojustakistus  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ;

$d$  – materjalikihi paksus  $\text{m}$ ;

$\lambda$  – materjali soojuserijuhtivus  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

Kogusoojustakistuse leidmiseks homogeensetest kihtidest koosneva hoonel, kasutatakse arvutusvalemit [34]

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \quad (2)$$

kus  $R_{tot}$  – kogusoojustakistus ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );

$R_{si}$  – piirdetarindi sisepinna soojustakistus ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );

$R_1, R_2 \dots R_n$  – iga kihi arvutuslik soojustakistus ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );

$R_{se}$  – piirdetarindi välispinna soojustakistus ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ).

Sisepinna soojustakistuse väärtuseks tuleb horisontaalse soojusvoolu suuna puhul võtta

$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$  ja välispinna soojustakistuseks  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ . [34]

Ventileerimata õhkvaheks defineeritakse õhkvahet, millel puuduvad tingimused õhuvoolu liikumiseks, horisontaalse soojusvoolu suuna puhul võib erineda horisontaalist kuni  $\pm 30^\circ$ .

Antud magistritööd vaadeldaval katseseinal puuduvad õhkvahe ventilatsioonivad ning arvutatakse kogu piirdetarindi soojustakistused. Õhkvahe soojustakistus horisontaalse soojusvoolu suuna puhul võetakse  $R = 0,18 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ . [34]

Soojusläbivus arvutatakse valemiga [34]

$$U = \frac{1}{R_{tot}}, \quad (3)$$

kus  $U$  – soojusläbivus  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;

$R_{tot}$  – tarindi kogusoojustakistus ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ).

Iga tarindikihi temperatuuri arvutusvalem. [40]

$$t_i = t_s - (t_s - t_v) \cdot \frac{\sum R_s}{R}, \quad (4)$$

kus  $t_i$  – vaadeldava kihi pinnatemperatuur  $^\circ\text{C}$ ;

$t_s$  – sisetemperatuur  $^\circ\text{C}$ ;

$t_v$  – välistemperatuur  $^\circ\text{C}$ ;

$\sum R_s$  – materjalikihtide soojustakistused kuni arvutatava pinnani ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );

$R$  – piirde kogusoojustakistus ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ).

Materjalikihi veeaurutakistuse arvutusvalem [41]

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p}, \quad (5)$$

kus  $Z_p$  – materjalikihi veeaurutakistus  $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$ ;

$d$  – materjalikihi paksus  $\text{m}$ ,

$\delta_p$  – materjali veeauruerijuhtivus  $\text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$

Veeauru difusioontakistusteguri valem [41]

$$\mu = \frac{\delta_{p,\delta hk}}{\delta_p}, \quad (6)$$

kus  $\mu$  – veeauru difusioontakistustegur;

$\delta_p$  – materjali veeauruerijuhtivus  $\text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ;

$\delta_{p,\delta hk}$  – õhu veeauruerijuhtivus  $\approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ .

Tarindikihtide veeauru osarõhu valem [41]

$$p_n = p_{in} - \frac{Z_n}{Z_T} (p_{in} - p_{out}), \quad (7)$$

kus  $p_n$  – piirde kihtide veeauru osarõhk  $\text{Pa}$ ;

$p_{in}$  – siseõhu veeauru osarõhk  $\text{Pa}$ ;

$p_{out}$  – välisõhu veeauru osarõhk  $\text{Pa}$ ;

$Z_n$  – arvutatavale pinnale eelnevate materjalikihtide aurutakistus  $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$ ;

$Z_T$  – tarindi koguveeaurutakistus  $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$ .

Veeauru küllastusrõhu valem, kui temperatuur on üle  $0^\circ \text{C}$  [33]

$$p_{sat} = 610,5 e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,2 + \theta}}, \text{ kui } \theta \geq 0^\circ \text{C}, \quad (8)$$

kus  $p_{sat}$  – veeauru küllastusrõhk  $\text{Pa}$ ;

$\theta$  – temperatuur  $^\circ \text{C}$ .

Veeauru küllastusrõhu valem, kui temperatuur on alla  $0^\circ \text{C}$  [33]

$$p_{sat} = 610,5 e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}}, \text{ kui } \theta < 0^\circ \text{C}, \quad (9)$$

kus  $p_{sat}$  – veeauru küllastusrõhk  $\text{Pa}$ ;

$\theta$  – temperatuur  $^\circ \text{C}$ .

Suhtelise niiskuse arvutamise valem [41]

$$RH = \frac{p}{p_{sat}} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

kus  $RH$  – suhteline niiskus %;

$p$  – tegelik veeauru osarõhk Pa;

$p_{sat}$  – maksimaalne veeauru osarõhk Pa.

Õhu veeaurusisalduse küllastustaseme arvutamise valem [41]

$$\nu_{sat} = \frac{M_w \cdot p_{sat}}{R \cdot T}, \quad (11)$$

kus  $\nu_{sat}$  – õhu veeaurusisalduse küllastustase kg/m<sup>3</sup>;

$M_w$  – vee molekulaarmass 18,02 kg/kmol;

$p_{sat}$  – veeauru küllastusrõhk Pa;

$R$  – gaasikontant 8314,3 J/(kmol·K);

$T$  – õhu absoluutne temperatuur K.

Ruumide niiskuslisa arvutusvalem [41]

$$\Delta \nu = \nu_i + \nu_e, \quad (12)$$

kus  $\Delta \nu$  – niiskuslisa g/m<sup>3</sup>;

$\nu_i$  – siseõhu veeaurusisaldus g/m<sup>3</sup>;

$\nu_e$  – välisõhu veeaurusisaldus g/m<sup>3</sup>.

Temperatuuriindeksi arvutamiseks vahelae ja seina nurkades kasutati valemit [37]

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_{int} - \theta_e}, \quad (13)$$

kus  $f_{Rsi}$  – temperatuuriindeks sisepinna mingis punktis;

$\theta_{si}$  – temperatuur sisepinna mingis punktis °C;

$\theta_{int}$  – sisetemperatuur °C;

$\theta_e$  – välistemperatuur °C.

Kui hoone konstruktsioonis on vesi kondenseerunud, siis ei tohi kondensvesi tekitada konstruktsioonidele ja soojustusmaterjalidele kahjustusi. Vastavalt DIN 4108-3 järgi tuleks jälgida, et kondensvesi kuivaks välja kuivamisperioodi jooksul (kondenseerumise periood Eestis 3 kuud ehk 2160 h), kondensvee kogus ei tohi olla üle  $1,0 \text{ kg/m}^2$  ning konstruktsioon ei tohi saada kahjustusi. Kondenseerumise perioodil on tingimusteks välistemperatuur  $-10^\circ\text{C}$  ja õhuniiskuse 80 %, sisetemperatuur  $+20^\circ\text{C}$  ja õhuniiskuse 50 %. Aurustumisperioodil (Eestis 3 kuud ehk 2160 h) seintel ja vahelagedel nii sise- kui väliskliima temperatuur  $+12^\circ\text{C}$  ja õhuniiskuse 70 %, kliima kondenseerumise kohas  $+12^\circ\text{C}$ , suhtelise õhuniiskusega 100 %.[52]

Hoonetarindites oleva kondenseerunud veeauru väljakuivamise arvutamiseks kasutatakse valemeid 14 – 23.

Materjali difusioonitakistuse arvutusvalem [52]

$$S_d = \mu \cdot d, \quad (14)$$

kus  $S_d$  – materjali difusioonitakistus m;

$\mu$  - materjali difusioonitakistustegur;

$d$  – materjalikihi paksus m.

Kogu seinakihi difusioonitakistuse arvutusvalem [52]

$$S_d = S_{d1} + S_{d2} + \dots + S_{dN}, \quad (15)$$

kus  $S_d$  – kogu seinakihi difusioonitakistus m;

$S_{d1}, S_{d2}, S_{dN}$  – seinakihtide difusioonitakistus m.

Veeauru osarõhu arvutusvalem [52]

$$P = P_{sat} \cdot RH, \quad (16)$$

kus  $P$  – Tegelik veeauru osarõhk Pa;

$P_{sat}$  – maksimaalne veeauru osarõhk Pa;

$RH$  – suhteline õhuniiskuse %.

Seina veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seina arvutusvalem [52]

$$1/\Delta = \sum(\mu \cdot d) \cdot 1,5 \cdot 10^6, \quad (17)$$



kus  $1/\Delta$  – materjalikihi veeauru difusioonitakistus  $\text{m}^2\text{hPa/kg}$ ;

$\mu$  – materjali difusioonitakistustegur;

$d$  – materjalikihi paksus  $\text{m}$ ;

Veeauru difusioonivoo arvutusvalem [52]

$$i = \frac{p_i - p_a}{1/\Delta}, \quad (18)$$

kus  $i$  – veeauru difusioonivoog  $\text{kg/m}^2\text{h}$

$1/\Delta$  – materjalikihi veeauru difusioonitakistus  $\text{m}^2\text{hPa/kg}$ ;

$p_i$  – sisemine osarõhk  $\text{Pa}$ ;

$p_a$  – välimine osarõhk  $\text{Pa}$ .

Veeauru difusioonivoo tihedus seest kondenseerumise piirkonda arvutusvalem [52]

$$i_i = \frac{p_i - p_{sw}}{1/\Delta_i}, \quad (19)$$

kus  $i_i$  – veeauru difusioonivoo tihedus seest kondenseerumise piirkonda  $\text{kg/m}^2\text{h}$

$1/\Delta_i$  – mitmekihilise seina veeauru difusioonitakistus  $\text{m}^2\text{hPa/kg}$ ;

$p_i$  – sisemine osarõhk  $\text{Pa}$ ;

$p_{sw}$  – kondenseerumise piirkonnale vastav osarõhk  $\text{Pa}$ .

Veeauru difusioonivoo tihedus kondenseerumise piirkonnast välja arvutusvalem [52]

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_a}{1/\Delta_a}, \quad (20)$$

kus  $i_a$  – veeauru difusioonivoo tihedus kondenseerumise piirkonnast välja  $\text{kg/m}^2\text{h}$

$1/\Delta_a$  – mitmekihilise seina veeauru difusioonitakistus  $\text{m}^2\text{hPa/kg}$ ;

$p_a$  – välimine osarõhk  $\text{Pa}$ ;

$p_{sw}$  – kondenseerumise piirkonnale vastav osarõhk  $\text{Pa}$ .

Kondenseerunud vee koguse arvutusvalem [52]

$$W_T = t_T \cdot (i_i - i_a), \quad (21)$$

kus  $W_T$  – kondenseerunud vee kogus  $\text{kg/m}^2$ ;

$t_T$  – kondenseerumise periood h;

$i_i$  – difusioonivoo tihedus seest kondenseerumise piirkonda  $\text{kg/m}^2\text{h}$ ;

$i_a$  – difusioonivoo tihedus kondenseerumise piirkonnast välja  $\text{kg/m}^2\text{h}$ .

Veeauru difusioonivoo tihedus kondenseerumise piirkonnast sisse arvutusvalem [52]

$$i_i = \frac{p_{sw} - p_i}{1/\Delta_i}, \quad (22)$$

kus  $i_i$  – veeauru difusioonivoo tihedus seest kondenseerumise piirkonda  $\text{kg/m}^2\text{h}$

$1/\Delta_i$  – mitmekihilise seina veeauru difusioonitakistus  $\text{m}^2\text{hPa/kg}$ ;

$p_i$  – sisemine osarõhk Pa;

$p_{sw}$  – kondenseerumise piirkonnale vastav osarõhk Pa.

Kondenseerunud vee koguse arvutusvalem [52]

$$W_v = t_v \cdot (i_i + i_a), \quad (23)$$

kus  $W_v$  – kondenseerunud vee kogus  $\text{kg/m}^2$ ;

$t_v$  – kuivamise periood h;

$i_i$  – difusioonivoo tihedus seest kondenseerumise piirkonda  $\text{kg/m}^2\text{h}$ ;

$i_a$  – difusioonivoo tihedus kondenseerumise piirkonnast välja  $\text{kg/m}^2\text{h}$ .

## 3.2. THERM

Andmete võrdlemiseks ja analüüsi tegemiseks on kasutatud antud magistritöö raames arvutisimulatsiooniprogrammi THERM 7.7. Kahemõõtmeline (2D) simulatsiooniprogramm on välja töötatud Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) simuleerimisjuhendi alusel. Programm põhineb numbrilisel lõplike elementide meetodil ning peamiselt on mõeldud püsivate ääritingimustega ülesande lahendamiseks. THERM'i abil on võimalik hinnata konstruktsioonisõlmede soojusläbivust, külmasildade tekkekohta ning nende kriitilisust ja hallituse tekkeohtu temperatuurindeksite abil. [35, 36]

Arvutisimulatsiooniprogrammis THERM on kasutatud I korruse ja välikeskkonna andmed võetud DIN 4108-3 järgi ning II korruse andmed on võetud enda mõõdetud andmete keskmised tulemused. I korruse sisetemperatuuriks + 20 °C ja õhuniiskus 50 % ning välikeskkonna temperatuuriks on valitud -10 °C õhuniiskusega 80 % [42]. II korruse sisekeskkonna temperatuuriks võeti + 8 °C, õhuniiskus 60 %. Mudelis kasutatud materjalide tehnilised näitajad on toodud välja lisa 2.

Simulatsiooniprogrammi modelleerimisel on võetud arvesse standardis EVS-EN ISO 10211:2017 väljatoodud modelleerimismõõdud. Mudeli koostamisel peab mudel olema ümbritsetud katkestuskohtadega, piirdetarindi arvutusulatus vähemalt 1 meeter või kolmekordne külgelemendi paksus ning mudelit võib koostada ka lihtsustatuna. [37]

Thermi abil arvutati temperatuurindeksid valemiga 13 ning kontrolliti seinakihtide temperatuuri arvutusi. EVS-EN ISO 13788:2012 standardi järgi enne 2000.aastat ehitatud või rekonstrueeritud niiskusklassiga 2 või alla selle hoonete temperatuurindeksi piirsuurus on  $\geq 0,65$  [33]. Kõrgema temperatuurindeksi puhul on oht hallituse tekkele väiksem.

### **3.3. Delphin**

Andmete võrdlemiseks ja analüüsi tegemiseks on kasutatud lisaks THERM simulatsiooniprogrammile ka Saksamaal Dresdeni Tehnikaülikoolis väljatöötatud Delphin 5.9 programmi. Delphini programmi abil on võimalik hinnata konstruktsioonitarindite soojus- ja niiskustehnilist toimivust. Programmi kasutatakse külmasildade, kondenseerumise, hallituse kasvu riskide hindamiseks. Samas võimaldab ka hinnata ventileeritavate fassaadisüsteemide ja katuste toimivust, soojusisolatsioonisüsteemide vajalikkust ja sobilikkust ning aastase küttevajaduse arvutamist lisaks paljule muule. [38]

Delphini mudelis kasutatud materjalide tehnilised näitajad on toodud välja lisa 2.

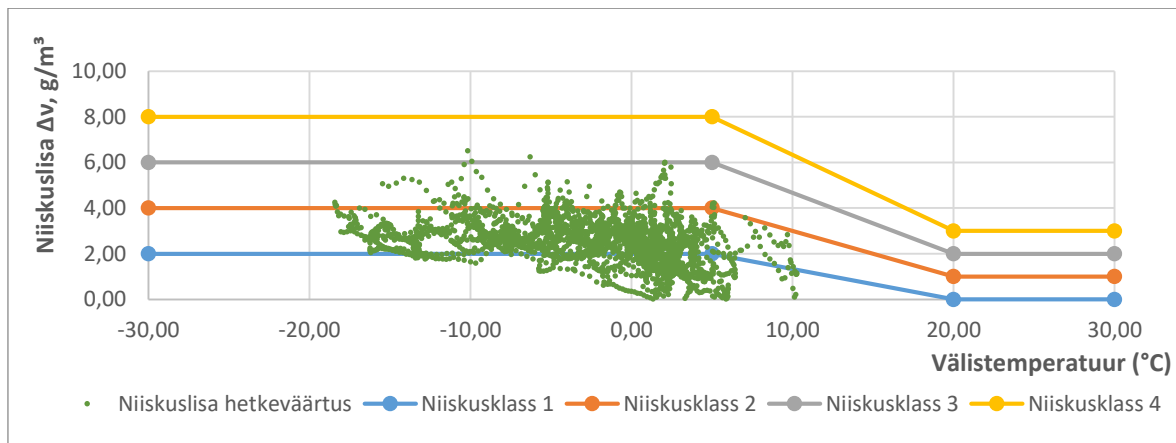
### 3.3.1. Delphini simulatsioonis kasutatav välis- ja sisekliima

Delphini arvutisimulatsiooniprogrammis on kasutatud Targo Kalamees ja Juha Vinha koostatud hallituse testaastat hallituse riski kasvuks ja kondensi testaastat veeauru kondenseerumise kontrollimiseks. Nad hindasid kuue ilmajaama põhjal Eesti kliimaandmeid aastatel 1970 – 2000. Kliima andmete jaoks kasutati õhutemperatuuri ja suhtelist õhuniiskust. Hallituse ja veeauru kondenseerumise testaastad koostati Väike-Maarjast saadud andmete järgi. Hallituse kasvu kriitiline aasta saadi Väike-Maarjas juuli 1989 kuni juuni 1990 ning niiskuse kondenseerumise kriitiline aasta oli Väike-Maarjas juuli 1995 kuni juuni 1996. Uurimustöös kogutud andmete põhjal on nende testaastate esinemise võimalus kord kümne aasta jooksul. [39]

Ruumides paiknenud andmesalvestitest saadi ruumide sisetemperatuurid ja õhuniiskused. Sama perioodi välitemperatuuri ja õhuniiskuse andmed saadi Riigi Ilmateenistusest ning puuduolevad üksikud väliandmed võeti Eesti Maaülikooli ilmajaamast. Nende põhjal leiti sõltuvus sise- ja välitemperatuuri vahel ning määrati ka ruumi niiskusklass. Temperatuuride omavahelise sõltuvuse valemi ja niiskusklassiga loodi katseobjekti sisekliima andmestik, millest sõltub ka Delphini programmis kasutatavad hallituse ja veeauru kondenseerumise testaastad.

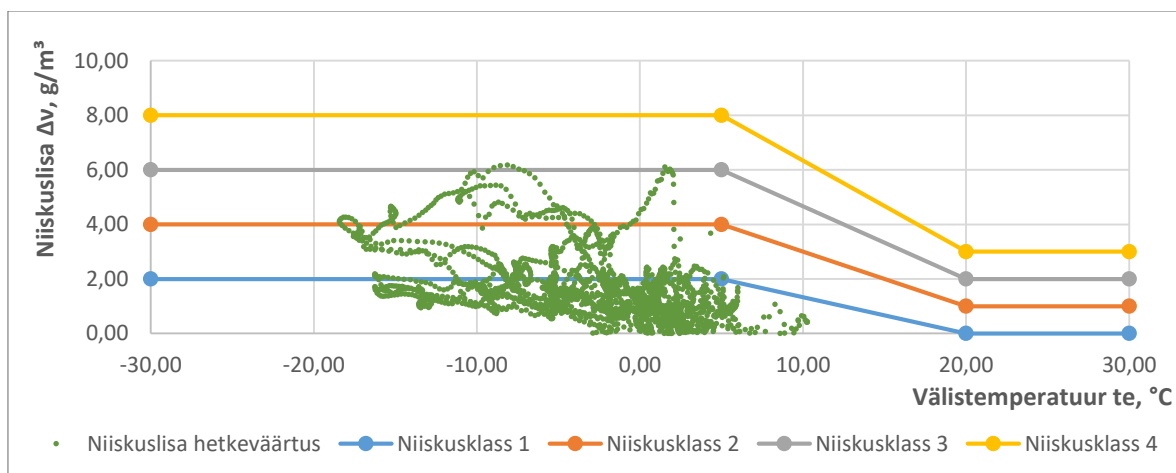
Niiskusklassid määrati ajavahemikul 13.11.2020 kuni 15.03.2021. Niiskusklasside koostamiseks kasutati iga tunni keskmist väärtust. Antud magistritöö raames andmesalvestitega mõõdetud andmetega loodi vastav sisekliima andmestik, milles kasutati valemeid 8, 9, 11, 12.

Graafiku horisontaaltelg näitab iga tunni kohta keskmist välitemperatuuri väärtust ning vertikaaltelg niiskusklassi iga tunni keskmist väärtust valitud ajavahemikul. Enamik I korruse niiskusklassi hetkeväärtuse punkte jääb allapoole niiskusklass 2 joont (vt. Joonis 28) ning antud niiskusklass sai valituks edasisteks arvutusteks. Standardi EVS-EN ISO 13788:2012 järgi on niiskusklass 2 määratud eluruumile, mille asustustihedus on üle 30 m<sup>2</sup> inimese kohta [33].



**Joonis 28.** I korruse katseruumi niiskuselisa iga tunni keskmise kohta.

Graafiku horisontaaltelg näitab iga tunni kohta keskmist välistemperatuuri väärtust ning vertikaaltelg niiskuselisa iga tunni keskmist väärtust valitud ajavahemikul. Enamik II korruse niiskuselisa hetkeväärtuse punkte jääb allapoole niiskusklass 1 joont (vt. Joonis 29) ning antud niiskusklass sai valituks edasisteks arvutusteks. Standardi EVS-EN ISO 13788:2012 järgi on niiskusklass 1 määratud mitteiluruumidele (töö- ja õpperuumid jms), kus on väga väike niiskustootlus [33]. Antud elamu on alaliselt elaniketa ja kasutuseta ning niiskuselisa seetõttu ka väiksem. Talvel võib niiskuselisa jääda alla  $2 \text{ g/m}^3$  [6].

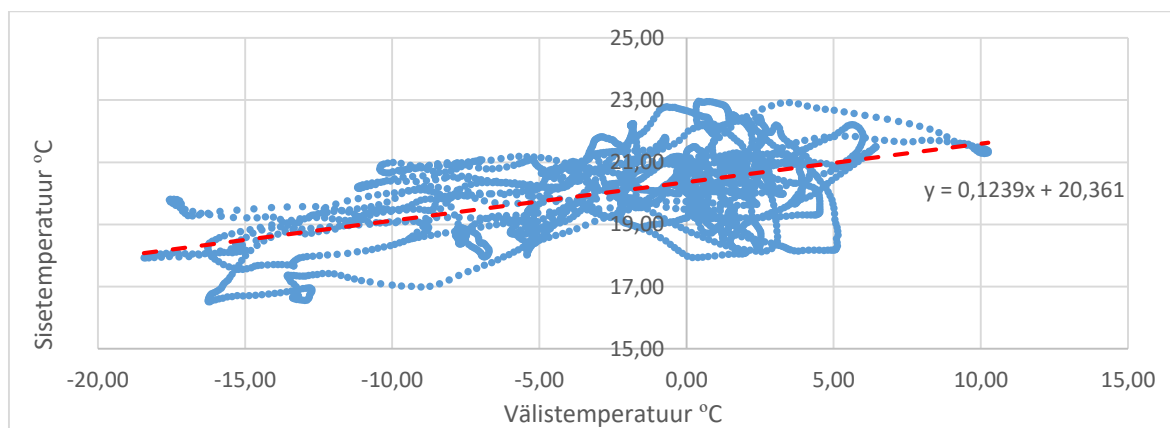


**Joonis 29.** II korruse katseruumi niiskuselisa iga tunni keskmise kohta.

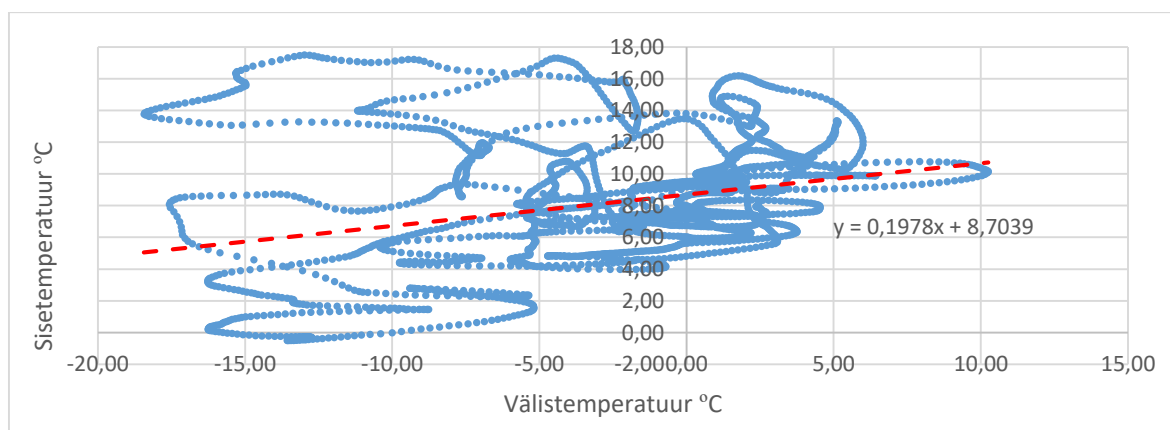
Sise- ja välisõhu temperatuuride omavahelise sõltuvuse määramiseks kasutati andmeid ajavahemikul 13.11.2020 – 15.03.2021. Temperatuuride sõltuvus määrati nii esimese kui ka teise korruse ruumis.

Joonistel 30 ja 31 on näidatud ruumi sisetemperatuuri ja välistemperatuuri omavaheline sõltuvus, kus igale välisõhu temperatuurile vastab punkt ruumi siseõhu temperatuuri kohta. I korruse ruumis elavad alaliselt elanikud sees ning siseõhu temperatuuri hoitakse elamiseks sobilikuna. Jooniselt 28 on näha, et tänu kütmisele andmepunktide kõikumine on väike, vahemikus 16 kuni 23 °C. II korruse ruumi köeti kogu katsetulemuste salvestamise ajal kaootiliselt. Jooniselt 29 on selgelt võimalik eristada andmepunkte, mis on salvestatud just kütmise ajal. Tänu kütmisele on II korruse ruumi temperatuur olnud vaadeldaval perioodil keskmiselt 8 °C.

Sõltuvusest saadud valemit kasutati hallituse ja kondensitekke testaasta hindamiseks ning saadud oma sisekliima sisestati Delphini programmi. Perioodi 14.11.2020 – 14.03.2021 võrreldi mõõdetud tulemustest koostatud graafikutega ning Delphini arvuti-simulatsiooniprogrammi poolt koostatud graafikutega.



**Joonis 30.** I korruse sise- ja välisõhu temperatuuride sõltuvus.



**Joonis 31.** II korruse sise- ja välisõhu temperatuuride sõltuvus.

Hallitusindeks arvutati Delphin arvutisimulatsiooniprogrammiga talade otste ülaserpa paigaldatud M0 ja M4 andurite tulemustele, sest nende kahe anduri maksimaalsed õhuniiskuse tulemused ületasid 90 % piiri ning keskmiste mõõtetulemuste poolest olid need kaks kõige halvemate näitajatega.

Hallituseindeks M ei tohiks olla suurem kui 1, vastasel juhul oleks hallituse kasv juba suurem kui 10 % (mikroskoobi alt vaadelduna). Hallitusindeksite tähendused on toodud tabelis 1. [14]

**Tabel 1.** Hallitusindeksi iseloomustus [14]

Hallitusindeks M	Indeksi iseloomustus
0	Hallituse kasv puudub
1	Hallituse kasv väike, tuvastatav mikroskoobiga
2	Hallituse kasv keskmine, tuvastatav mikroskoobiga ning kaetud üle 10 %
3	Hallituse kasv väike, tuvastatav visuaalselt
4	Hallituse kasv, tuvastatav visuaalselt ning kaetud üle 10 %
5	Hallituse kasv, tuvastatav visuaalselt ning kaetud üle 50 %
6	Hallituse kasv, tuvastatav visuaalselt ning kaetud 100 %

## 4. TULEMUSED JA ANALÜÜS

### 4.1. Kastepunkti meetodi tulemused ja analüüs

#### 4.1.1. Soojustamata välissein

Katseobjekti sein ehitusfüüsikalist toimivust analüüsiti kõigepealt kastepunkti meetodiga. Arvutused teostati käsitsi, kasutades Microsoft Excel tabelarvutustarkvara. Sein soojustakistuse leidmiseks kasutati valemeid 1, 2 ja 4 ning soojusläbivus arvutati valemiga 3. Lähteandmeteks võeti DIN 4108-3 järgi sisetemperatuuriks + 20 °C ja õhuniiskus 50 % ning välikeskkonna temperatuuriks on valitud – 10 °C õhuniiskusega 80 %. Arvutuste tulemused on välja toodud tabelis 2.

**Tabel 2.** Soojustamata seinakihtide temperatuuride arvutustabel

	/tähis	Paksus d	Soojus- erijuhtivus $\lambda_d$	Soojus- takistus R	Temperatuur ti	Temperatuuride erinevus $\Delta t$
Kihi nr.	Materjali kiht / ühik	[mm]	[W/(mK)]	[m <sup>2</sup> ·K/W]	[°C]	[°C]
0	Siseõhk			0,13	20,00	2,84
1	Sisepinna soojustakistus				17,16	
	Krohv	15	0,65	0,02		0,50
2					16,65	
	Tellis	130	0,7	0,186		4,06
3					12,59	
	Õhkvahe	50	0,18	0,278		6,08
4					6,52	
	Tellis	160	0,7	0,229		5,00
5					1,52	
	Õhkvahe	50	0,18	0,278		6,08
6					-4,56	
	Tellis	130	0,7	0,186		4,06
7					-8,62	
	Krohv	15	0,65	0,02		0,50
8	Välispinna soojustakistus				-9,13	
9	Välisõhk			0,04	-10,00	0,87
	Kokku	550		1,372		
	Soojusläbivus [W/m <sup>2</sup> ·K]			0,73		



Soojustamata välisseina soojuslähivuse väärtuseks saadi  $U = 0,73 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , mis ei jää endises määruus soovitatud elamu välisseina soojuslähivuse piiridesse. Endises määruus on soovituslikuks soojuslähivuseks välisseinal  $U = 0,12\text{-}0,22 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  [50].

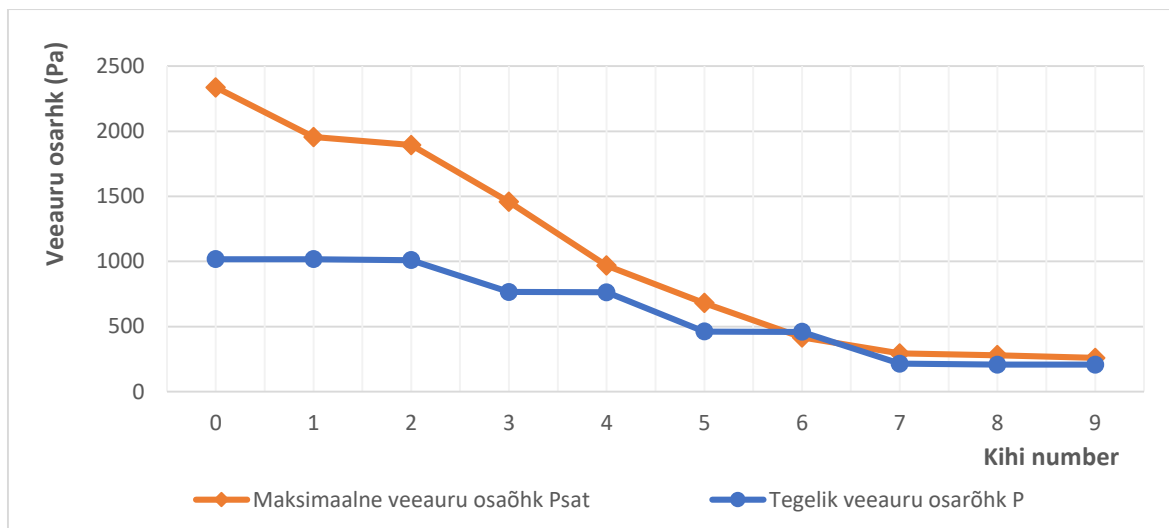
Vastavalt saadud temperatuuridele materjali piirpindadel, leiti nendele pindadele veeauru küllastusrõhud ning iga tarindikihi veeauru osarõhud kasutades valemeid 5 ja 7. Maksimaalse veeauru osarõhu arvutamiseks kasutati valemeid 8 ja 9 ning suhteline niiskus leiti valemiga 10. Arvutuste tulemused on toodud tabelis 3.

**Tabel 3.** Soojustamata seinakihtide veeauru osarõhkude arvutustabel

	/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur $\mu$	Maksi- maalne veeauru osaõhk $P_{\text{sat}}$	Veeauru- takistus $Z_p$	Tegelik veeauru osarõhk P	Veeauru osarõhu erinevus $\Delta p$	Suhteline niiskus RH $\varphi$
Kihi nr.	Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[Pa]	$[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}}{\text{kg} \cdot 10^6}]$	[Pa]	[Pa]	[%]
0	Siseõhk			2337		1169		50
1	Sisepinna soojustakistus			1956		1169		60
2	Krohv	15	10	1894	0,225	1160	9	61
3	Tellis	130	37,6	1457	7,332	870	290	60
4	Õhkvahe	50	1	968	0,075	867	3	90
5	Tellis	160	37,6	681	9,024	510	357	75
6	Õhkvahe	50	1	417	0,075	507	3	122
7	Tellis	130	37,6	293	7,332	216	290	74
8	Krohv	15	10	280	0,225	207	9	74
9	Välispinna soojustakistus			259		207		80
	Kokku	550			24,29			

Märkus. Arvutustes kasutatud difusioonitakistustegurid on võetud EVS-EN ISO 10456:2008 tabel 3, materjali tootja poolt väljastatud või *Masea. Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung* veebilehelt.

Tabel 3 andmete põhjal koostati graafik (vt. Joonis 32), millel on näha iga välisseinakihi oleva tegelikku ja maksimaalset veeauru osarõhku. Veeaur hakkab piirdesse kondenseeruma, kui tegelik veeauru osarõhk on suurem maksimaalsest veeauru osarõhkust.



**Joonis 32.** Soojustamata seinakihtide veeauru osarõhud.

Olemasoleva soojustamata seina kihtide vahel toimub kondenseerumine. Välimise õhkvahe ja telliskivi müüritise vahel on suhteline õhuniiskus arvutuste järgi üle 100 %. Veeauru kondenseerumisest hoone välispiirdesse tekib oht külmakahjustuste tekkele.

Valemitega 14 – 23 kontrolliti veeauru kondenseerumist ja aurustumist 3 kuu jooksul välispiirdes (vt. Tabel 4). Veeaur kondenseerub välisseina välimise õhkvahe ja telliskivi vahele lubatud koguses – alla  $1,0 \text{ kg/m}^2$ . Välisseinast aurustunud veekogus on suurem kui sinna kogunenud veeauru kondensaat ning selline tingimus vastab DIN 4108-3 esitatule.

**Tabel 4.** Soojustamata välisseina veeauru kondenseerumine ja aurustumine

	Kihi paksus	Difusiooni-takistus-tegur	Tegelik veeauru osarõhk	Maksimaalne veeauru osarõhk	Suhteline õhuniiskus	Seina veeauru difusiooni-takistus
	d, m	μ	p, Pa	p <sub>sat</sub> , Pa	RH, %	Z <sub>p</sub> , m <sup>2</sup> ·h·Pa/kg
Tarindi osa			207	259	80	
Välispind			207	280	74	0
Krohv	0,015	10	216	293	74	225000
Telliskivi	0,13	37,6	507	417	122	7332000
Õhkvahe	0,05	1	510	681	75	75000
Telliskivi	0,16	37,6	867	968	90	9024000
Õhkvahe	0,05	1	870	1457	60	75000
Telliskivi	0,13	37,6	1160	1894	61	7332000
Krohv	0,015	10	1169	1956	60	225000
Sisepind			1169	2337	50	0
Kondenseerumine						
Kondenseerumise aeg t <sub>T</sub> , h						2160
Difusioonivoo tihedus seest kondenseerumiskiirkonda i <sub>i</sub> , kg/m <sup>2</sup> h						4,49E-05
Difusioonivoo tihedus kondenseerumiskiirkonnast välja i <sub>a</sub> , kg/m <sup>2</sup> h						2,78E-05
Kondenseerunud vee kogus W <sub>T</sub> , kg/m <sup>2</sup>					0,037	<1
Aurustumine						
Aurustumise aeg t <sub>v</sub> , h			2160	Temperatuur, °C		12
Sisemine ja välimine osarõhk p <sub>i</sub> /p <sub>a</sub> , Pa			983	Suhteline õhuniiskus, %		70
Difusioonivoo tihedus seest kondenseerumiskiirkonda i <sub>i</sub> , kg/m <sup>2</sup> h						2,52E-05
Difusioonivoo tihedus kondenseerumiskiirkonnast välja i <sub>a</sub> , kg/m <sup>2</sup> h						5,57E-05
Aurustunud vee kogus W <sub>v</sub> , kg/m <sup>2</sup>					0,175	>W <sub>T</sub>

#### 4.1.2. Seespoolse soojusisolatsiooniga välissein

Katseobjekti sein ehitusfüüsikalist toimivust analüüsiti kõigepealt kastepunkti meetodiga. Arvutused teostati käsitsi, kasutades Microsoft Excel tabelarvutustarkvara. Sein soojustakistuse leidmiseks kasutati valemeid 1, 2 ja 4 ning soojusläbivus arvutati valemiga 3. Lähteandmeteks võeti DIN 4108-3 järgi sisetemperatuuriks + 20 °C ja õhuniiskus 50 % ning välikeskkonna temperatuuriks on valitud – 10 °C õhuniiskusega 80 %. Arvutuste tulemused on toodud tabelis 5.

**Tabel 5.** Seespoolse soojusisolatsiooniga seinakihtide temperatuuride arvutustabel

	/tähis	Paksus d	Soojus- erijuhtivus $\lambda_d$	Soojus- takistus R	Temperatuur ti	Temperatuuride erinevus $\Delta t$
Kihi nr.	Materjali kiht / ühik	[mm]	[W/(mK)]	[m²·K/W]	[°C]	[°C]
0	Siseõhk			0,13	20,00	1,37
1	Sisepinna soojustakistus				18,63	
	Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	0,25	0,05	18,11	0,53
2	ROCKWOOL Superrock soojustus	50	0,035	1,43		15,04
3	Krohv	15	0,65	0,02	3,07	0,24
4	Tellis	130	0,7	0,19	2,83	1,95
5	Õhkvahe	50	0,18	0,28	0,87	2,92
6	Tellis	160	0,7	0,23	-2,05	2,41
7	Õhkvahe	50	0,18	0,28	-4,46	2,92
8	Tellis	130	0,7	0,19	-7,38	1,95
9	Krohv	15	0,65	0,02	-9,34	0,24
10	Välispinna soojustakistus			0,04	-9,58	0,42
11	Välisõhk				-10,00	
	Kokku	612,5		2,85		
	Soojusläbivus U [W/m²·K]			0,35		

Seespoolse soojusisolatsiooniga välisseina soojusläbivuse väärtuseks saadi  $U = 0,35 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , mis ei jää endises määruuses soovitatud elamu välisseina soojusläbivuse piiridesse. Endises määruuses on soovituslikuks soojusläbivuseks välisseinal  $U = 0,12\text{-}0,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  [50]. Seespoolse soojusisolatsiooniga parandati välisseina soojusläbivust üle kahe korra ning sellega paranes ka ruumi soojuslik mugavus.

Vastavalt saadud temperatuuridele materjali piirpindadel, leiti nendele pindadele veeauru küllastusrõhud ning iga tarindikihi veeauru osarõhud kasutades valemeid 5 ja 7. Maksimaalse veeauru osarõhu arvutamiseks kasutati valemeid 8 ja 9 ning suhteline niiskus leiti valemiga 10. Arvutuste tulemused on toodud tabelis 6.

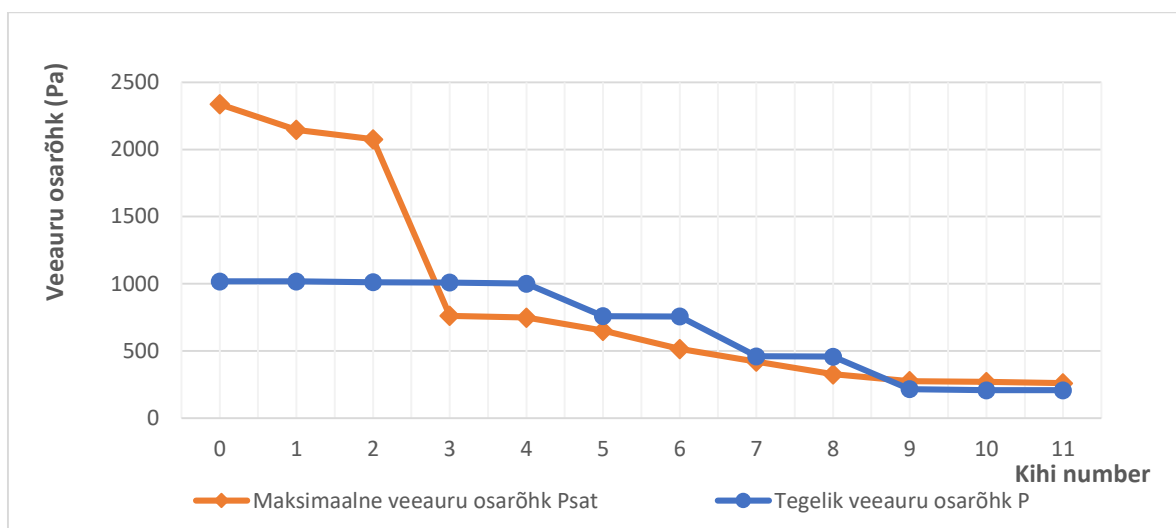
**Tabel 6.** Seespoolse soojusisolatsiooniga seinakihtide veeauru osarõhkude arvutustabel

	/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur $\mu$	Maksi- maalne veeauru osarõhk $P_{sat}$	Veeauru- takistus $Z_p$	Tegelik veeauru osarõhk P	Veeauru osarõhu erinevus $\Delta p$	Suhteline niiskus RH $\varphi$
Kihi nr.	Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[Pa]	$[\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}]$	[Pa]	[Pa]	[%]
0	Siseõhk			2337		1169		50
1	Sisepinna soojustakistus			2146		1169		54
	Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10		0,188		7	
2	ROCKWOOL			2077		1162		56
	Superrock soojustus	50	1		0,075		3	
3				761		1159		152
	Krohv	15	10		0,225		9	
4				748		1150		154
	Tellis	130	37,6		7,332		287	
5				650		863		133
	Õhkvahe	50	1		0,075		3	
6				515		860		167
	Tellis	160	37,6		9,024		353	
7				420		506		121
	Õhkvahe	50	1		0,075		3	
8				327		503		154
	Tellis	130	37,6		7,332		287	
9				275		216		79
	Krohv	15	10		0,225		9	
10	Välispinna soojustakistus			269		207		77
11	Välisõhk			259		207		80
	Kokku	612,5			24,55			

Märkus. Arvutustes kasutatud difusioonitakistustegurid on võetud EVS-EN ISO 10456:2008 tabel 3, materjali tootja poolt väljastatud või *Masea. Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung* veebilehelt.

Tabel 6 andmete põhjal koostati graafik (vt. Joonis 33), millel on näha iga välisseinakihi oleva tegelikku ja maksimaalset veeauru osarõhku. Veeaur hakkab piirdesse kondenseeruma, kui tegelik veeauru osarõhk on suurem maksimaalsest veeauru osarõhkust.

Olemasoleva seespoolse soojusisolatsiooniga välisseina kihtide vahel toimub kondenseerumine. Veeaur hakkab välisseina kondenseeruma välimise telliskivi rea ja õhkvahe juurest ning kondenseerub kuni soojustuse ja krohvi vahele. Veeauru kondenseerumisest hoone välispiirdesse tekib oht külmakahjustuste tekkele.



**Joonis 33.** Seespoolse soojusisolatsiooniga välisseina kihtide veeauru osarõhud.

Valemitega 14 – 23 kontrolliti veeauru kondenseerumist ja aurustumist 3 kuu jooksul välispiirdes (vt. Tabel 7). Veeaur kondenseerub alates välisseina välimise õhkvahe ja telliskivi vahelt kuni mineraalvilla ja krohvikihi vahele. Arvutuste kohaselt on välisseinast aurustunud veekogus on suurem kui sinna kogunenud veeauru kondensaat, kuid see tingimus ei saa kehtida enne, kui kondenseerunud veeauru hulk ei ole lubatud piirides. DIN 4108-3 järgi ei tohi olla kondenseerunud vee kogus suurem kui  $1,0 \text{ kg/m}^2$ . Veeauru kondenseerumise ja aurustumise arvutus iga kihi kohta on toodud lisas 3.

**Tabel 7.** Soojustatud välisseina veeauru kondenseerumine ja aurustumine

	Kihi paksus	Difusiooni- takistus- tegur	Tegelik veeauru osarõhk	Maksi- maalne veeauru osarõhk	Suhteline õhuniiskus	Seina veeauru difusioonitakistus
	d, m	m	p, Pa	$p_{\text{sat}}$ , Pa	RH, %	$Z_p$ , $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$
Tarindi osa			207	259	80	
Välispind			207	269	77	0
Krohv	0,015	10	216	275	78	225000
Telliskivi	0,13	37,6	503	327	154	7332000
Õhkvahe	0,05	1	506	420	120	75000
Telliskivi	0,16	37,6	859	515	167	9024000
Õhkvahe	0,05	1	862	650	133	75000
Telliskivi	0,13	37,6	1149	748	154	7332000
Krohv	0,015	10	1158	761	152	225000
Mineraalvill	0,05	1	1161	2077	56	75000
Kipsplaat	0,0125	10	1169	2146	54	187500
Sisepind			1169	2337	50	0
<b>Kondenseerumine</b>						
Kondenseerumise aeg $t_r$ , h						2160
Kondenseerunud vee kogus kokku $W_T$ , $\text{kg}/\text{m}^2$					2,13	> 1
<b>Aurustumine</b>						
Aurustumise aeg $t_v$ , h			2160	Temperatuur, °C		12
Sisemine ja välimine osarõhk $p_i/p_a$ , Pa			983	Suhteline õhuniiskus, %		70
Aurustunud vee kogus kokku $W_v$ , $\text{kg}/\text{m}^2$					2,76	> $W_T$

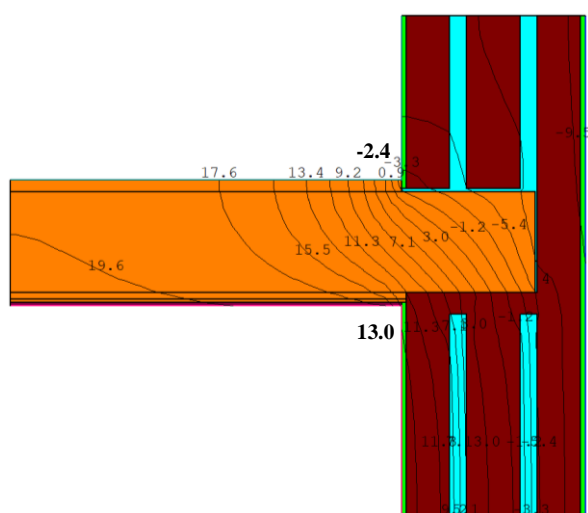
Soojuslikku mugavust ruumis tõsteti seespoelse soojustamisega, kuid samas tekitati sellega juurde veeauru kondenseerumise ja hallituse tekke riski. Veeauru kondenseerumisega on oht külmakahjustuste tekkeks ning sellega võib kahjustada kogu konstruktsiooni.

Seespoelse soojusisolatsiooniga seinale koostati iga kuu kohta kondenseerumise kontroll, lähteandmetena on kasutatud kondenseerumise testaastast saadud kuu keskmisi sisekliima ja väliskliima andmeid. Andmed on esitatud lisas 4.

## 4.2. Vahelaesõlm

### 4.2.1. Soojustamata välisseina ja vahelaue uurimine Thermiga

Therm arvutisimulatsiooniprogrammiga sooviti leida probleemsed kohad, kus on oht hallituse tekkele ja veeauru kondenseerumisele. Eelkõige kasutati Therm'i simulatsiooni temperatuuriindeksi arvutamiseks valemiga 13. Vahelaesõlme simulatsioon, kui I korruse välissein on soojustamata, on näha joonisel 34.



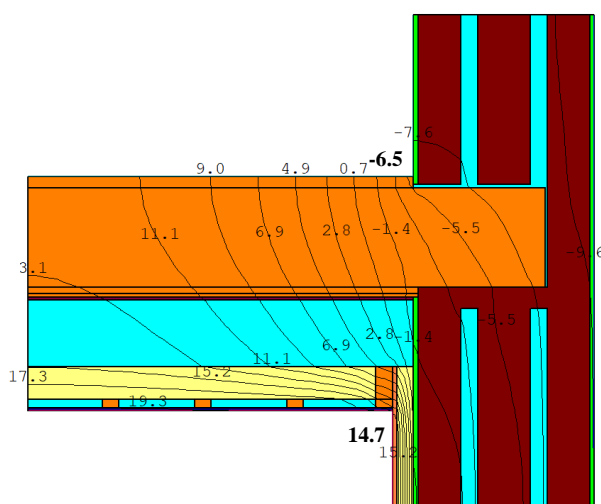
**Joonis 34.** Therm simulatsioon vahelaesõlmele, kui I korruse välissein on soojustamata.

Temperatuuriindeksi leidmisel lähtuti DIN 4108-3 toodud välis- ja sisekliima andmetest. Välistemperatuur  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja suhteline õhuniiskus 80 % ning sisetemperatuur  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja suhteline õhuniiskus 50 %. Soojustamata I korruse välisseina vahelaenurgas on temperatuuriindeks 0,77, temperatuur vahelaenurgas on  $13,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . II korruse põrandanurgas on temperatuuriindeksiks 0,25, temperatuur nurgas on  $-2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . EVS-EN ISO 13788:2012 standardi järgi on soovituslik temperatuuriindeks antud hoonel  $\geq 0,65$ . I korruse vahelaenurgas olev temperatuuriindeks on suurem kui soovituslik piirsuurus, seega oht hallituse tekkele on väike. See-eest on II korruse põrandanurgas temperatuuriindeks madalam kui soovituslik piirsuurus ja seega on oht hallituse tekkele.



#### 4.2.2. Soojustatud välisseina ja vahelaie uurimine Thermiga

Therm arvutisimulatsiooniprogrammiga sooviti leida probleemsed kohad, kus on oht hallituse tekkele ja veeauru kondenseerumisele. Eelkõige kasutati Therm simulatsiooni temperatuuriindeksi arvutamiseks valemiga 13. Vahelaesõlme simulatsioon, kui I korruse välissein on seespoolse soojusisolatsiooniga, on näha joonisel 35.



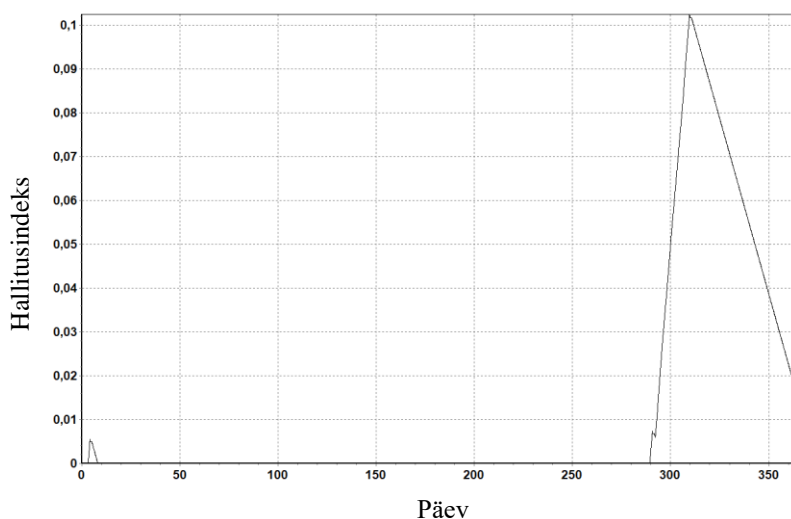
**Joonis 35.** Therm simulatsioon vahelaesõlmele, kui I korruse välissein on seespoolse soojusisolatsiooniga.

Temperatuuriindeksi leidmisel lähtuti DIN 4108-3 toodud välis- ja sisekliima andmetest. Välistemperatuur  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja suhteline õhuniiskus 80 % ning sisetemperatuur  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja suhteline õhuniiskus 50 %. Seespoolse soojusisolatsiooniga I korruse välisseina vahelaenurgas saadi temperatuuriindeksiks 0,82, temperatuur vahelaenurgas on  $14,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . II korruse põrandanurgas saadi temperatuuriindeksiks 0,12, temperatuur nurgas on  $-6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . EVS-EN ISO 13788:2012 standardi järgi on soovituslik temperatuuriindeks antud hoonel  $\geq 0,65$ . I korruse vahelaenurgas olev temperatuuriindeks on suurem kui soovituslik piirsuurus, seega oht hallituse tekkele on väike. See-eest on II korruse põrandanurgas temperatuuriindeks madalam kui soovituslik piirsuurus ja oht hallituse tekkele on olemas.

#### 4.2.3. Hallituse tekke kontrollimine Delphiniga vahelaesõlmele

Delphiniga kontrolliti kogu vahelaesõlmele ja vahelaetala otstesse paigaldatud andurite asukohtadesse hallituse tekke võimalust. Hallituse testaasta algab 01.juuli 1989 ja lõppeb 30.juuni 1990. Oli märgata Delphini simulatsioonis, et mida rohkem talve poole, seda rohkem hakkab seinakihtidesse tekkima niiskust. Talve keskpaigal oli seina välispinnal ja I korruse lisasoojustuse taga sama suhteline õhuniiskus. Suurem niiskusesisaldus tekkis talvel ka vahelaes osale, mis on toodud allapoole ning kus on ~200 mm paksune õhkvahe. Kevade tulekuga hakkab niiskus seinast välja kuivama ning testaasta lõpuks, ehk juuni lõpuks on seinakihtidest väga suur osa niiskusest välja kuivanud. Suurem niiskusesisaldus on vaid vahelaetala ümbruses.

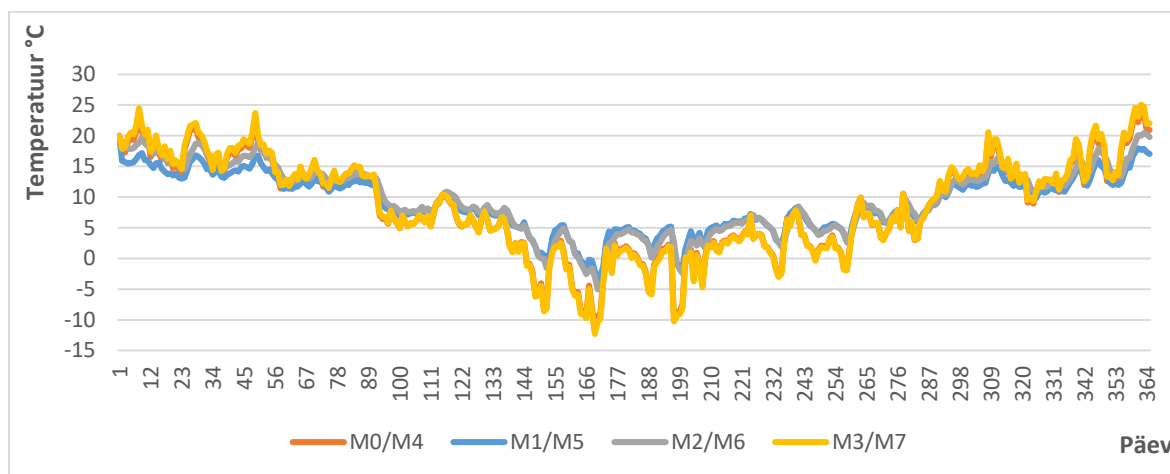
Delphini simulatsiooniprogrammiga selgus, et kogu testaasta jooksul on hallituse tekke võimalus andur M3/M7 juures. Hallitusindeks selles punktis on alla 1 ehk hallituse kasv on väga väike (vt. Joonis 36). Vertikaalsel teljel on hallitusindeksite väärtused ja horisontaalsel teljel on päevad. Graafik näitab, millise päeva juures hakkab hallituseindeks muutuma suuremaks kui null. Oht hallitus tekkele on väike, sest temperatuur on madal ja suhteline õhuniiskus suur.



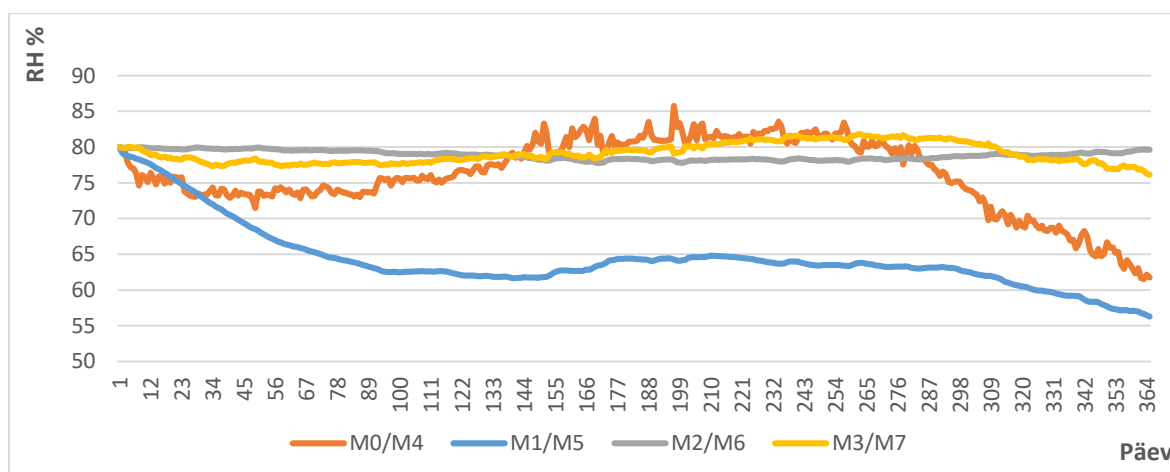
**Joonis 36.** Hallitusindeks andur M3/M7 juures.

Hallituse kasvu arenguks on vaja vähemalt 75 % suhtelist õhuniiskust ja + 20 °C [14]. Hallituse testaastast saadud andurite asukohtade temperatuuride ja õhuniiskusega tehtud graafikutest selgub, et talaotstes on õhuniiskus hallituse tekkeks sobilik (vähemalt 75 %),

kuid temperatuur on enamasti alla + 20 °C (vt. Joonis 37Joonis 38). Välisseina seespoolne soojusisolatsioon ning vahelae alla poole toomine ei tekita vahelaeta otsesse hallitust.

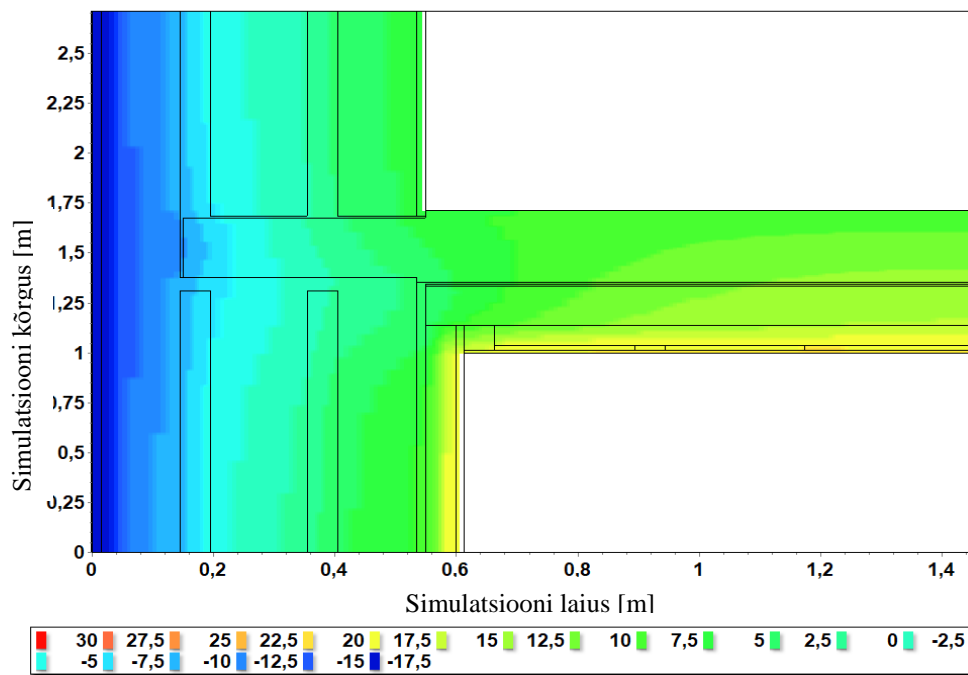


**Joonis 37.** Delphini andurite temperatuurid hallituse testastast.



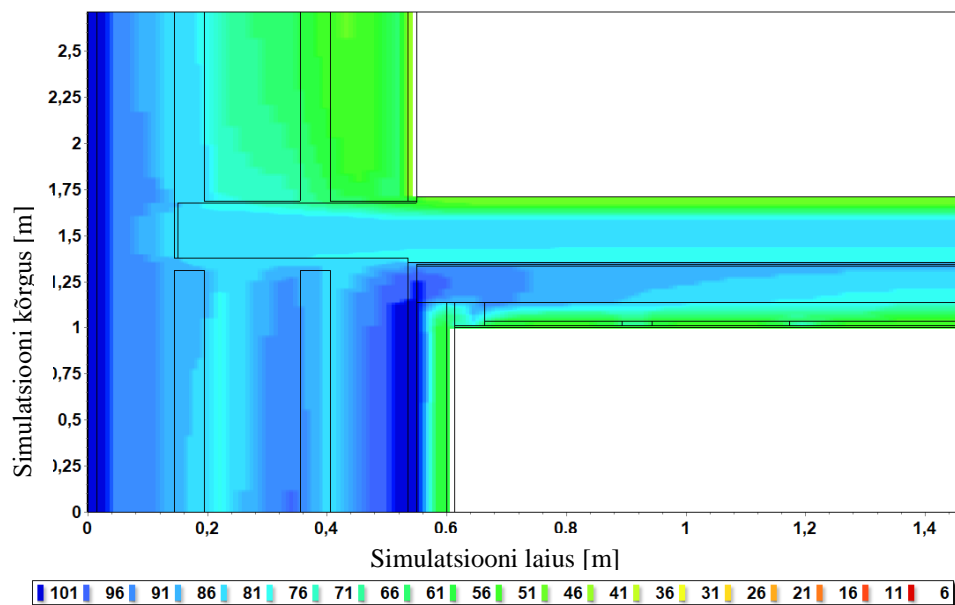
**Joonis 38.** Delphini andurite suhtelised õhuniiskused hallituse testastast.

Talveperioodil külmus sein poole ristlõike ulatuses läbi kuni sisemise õhkvaheni. Sein lisasoojustuse taga ja II korrusel olid samade temperatuuridega. Ehk otse lisasoojustuse taga aasta jooksul sein läbi ei külmunud, vaid hakkas läbi külmuma alates sisemisest õhkvahest väljapoole (vt. Joonis 39). Vertikaalne telg näitab simulatsiooni vaadeldava punkti kõrgust, horisontaalne telg simulatsiooni vaadeldava punkti laiust ning joonise all toodud legendis on näidatud värvidega temperatuur kraadides.



**Joonis 39.** Delphini simulatsioon hallituse testaasta temperatuur talve keskpaigas.

Soojusisolatsiooni lisamine tekitas olukorra, kus soojustuse taga on suhteline õhuniiskus sama, mis välisõhus ja välimise piirdekihis (vt. Joonis 40). Vertikaalne telg näitab simulatsiooni vaadeldava punkti kõrgust, horisontaalne telg simulatsiooni vaadeldava punkti laiust ning joonise all toodud legendis on näidatud värvidega suhtelise õhuniiskuse sisaldust protsentides.



**Joonis 40.** Delphini simulatsioon hallituse testaasta suhteline õhuniiskus talve keskpaigas.

Delphini simulatsiooni järgi talvel hallitust soojustuse taga tekkida ei tohiks, kuigi õhuniiskus on hallituse tekkeks sobilik, siis temperatuur on madalam, kui hallitusseente arenguks vaja oleks. Temperatuur seespoolse soojusisolatsiooni taga on 12,5 °C. Hallitusseente graafiku järgi on võimalus hallituse kasvuks nendel tingimustel siiski olemas. Hallitusseente arenguks on parim temperatuur +20 - +35 °C, see aga ei tähenda seda, et madalamal temperatuuril hallitusel elutegevust ei toimuks. Kui eosed on juba tekkinud, siis kasvavad hallitusseened alates 0 °C ja kõrge õhuniiskuse juures probleemideta. Vahelaetala otsad on talvel külmunud, seda suuresti tänu kahele õhkvahele. Niiskusesisaldus vahelaetalas on stabiilselt aastaringselt 80 – 90 % juures. Vahelaetala otstel on suur potentsiaal külmakahjustusteks ja samuti on need külmasillaks ning seetõttu on ka II korruse põranda nurgas suurem temperatuuriindeks kui lubatud. Pikaajaline kõrge niiskusesisaldus puidus pakub hallitusseente ja mädanike kasvuks toitaineid ja sobilikku keskkonda.

Katses vaadeldav üks tala asus akna all, mistõttu võib selle talaotsa juures olev õhuniiskus olla kõrgem ja temperatuur madalam. Aknad võivad olla paigaldatud halvasti ja juhtida õhkvahedesse rohkem õhuniiskust. Kuna akna all olev kiviseina osa on madalam kui teise tala kohal, siis tänu sellele võib olla sealse tala juures ka temperatuur madalam, sest akna pinnast ja akna paigalduse õhupiludest võib jahedam õhk pääseda lihtsamini talaotsani.

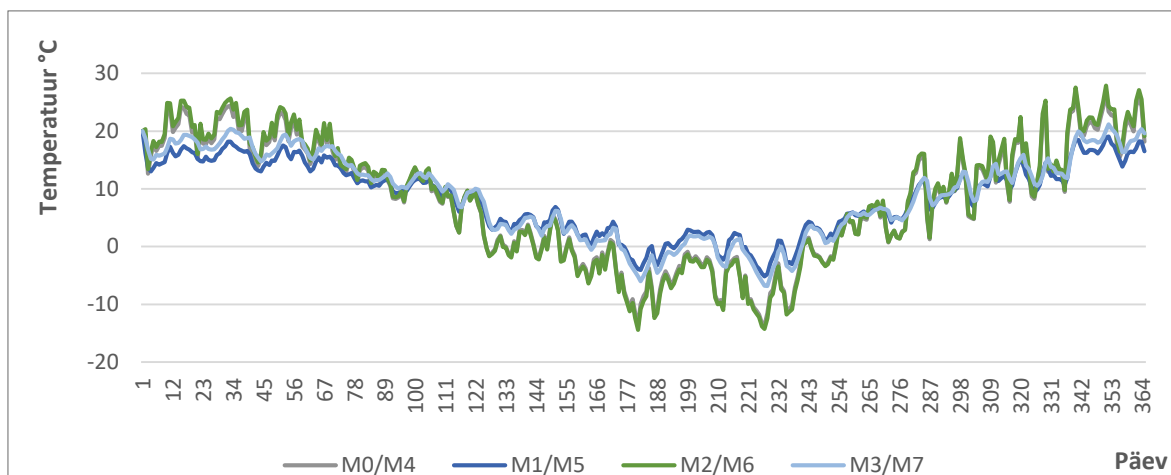
Kevade keskpaigas on olukord, kus väliõhu temperatuuri soojenemisega ja ruumi kütmisest tekkiv soojus salvestub kiviseina ning hoiab soojemat temperatuuri ka soojustuse taga. Kevade soojade ilmadega on hakanud välisseina välimistest kihtidest niiskus välja aurustuma, kuid seespoolse isolatsiooni taga on õhuniiskus ikka väga kõrge. Suur tõenäosus, et talve ja kevade perioodi jooksul siiski hallitus seina sisepinna ja soojustuse vahele tekib, kuna niiskuse sisaldus ja temperatuur püsivad pikalt piisavalt kõrgel.

Delphini simulatsiooniprogrammis katsetati ka talaotsapealse õhkvahe PUR-vahuga õhutihedaks tegemist, kuid suuri erinevusi antud 2D simulatsioon ei andnud. Tuleks katsetada simulatsiooni 3D mõõtmelisena. Rohkem pilte 2D simulatsioonist lisas 3.

#### 4.2.4. Kondensatsioonitekke kontrollimine Delphiniga vahelaesõlmele

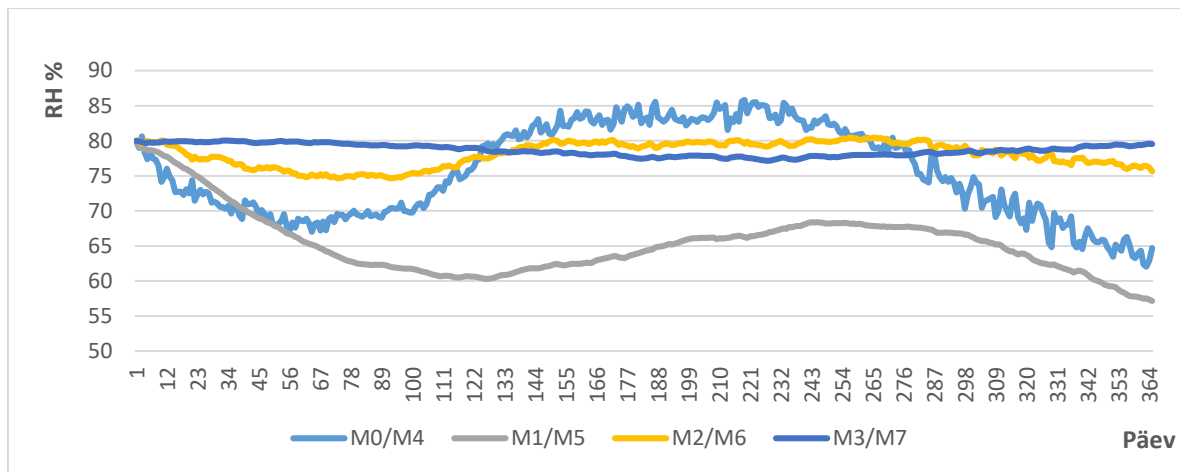
Delphiniga kontrolliti kogu vahelaesõlmele ja vahelaetala otstesse paigaldatud andurite asukohtadesse kondensatsiooni tekke võimalust. Kondensatsiooni testaasta algab 01.juuni 1995 ja lõppeb 31.mai 1996.

Kondensaadi testaastast saadud andurite asukohtade temperatuuride ja õhuniiskusega tehtud graafikutest selgub, et talaotstes välimises õhkvahehes olevad andurid M0/M4 ja M2/M6 on temperatuuri poolest sama kõikuvad ning sisemises õhkvahehes olevad andurid M1/M5 ja M3/M7 niisamuti (vt. Joonis 41). Joonisel 41 on vertikaalne telg näitab temperatuuri kraadides ning horisontaalne telg näitab päeva numbrit kondensaadiaastas.



**Joonis 41.** Delphini andurite temperatuurid kondensaadi testaastas.

Tala peal olevad andurid M0/M4 ning M1/M5 on õhuniiskuse tulemustelt rohkem kõikuvad kui tala all servas olevad andurid M2/M6 ja M3/M7 (vt. Joonis 42). Suhtelise õhuniiskuse suured erinevused võivad tulla sellest, et tala alumine äär on vastu telliseid ja ümbert rohkem kaetud, kui tala ülemine serv, mis on avatud õhkvahele ning talade peal on 10 mm õhkvahe. Alumises servas nii suurt õhuliikumist ei toimu ja seega on ka väiksem õhuniiskuse sisaldusel väiksem kõikumine. Välisseina seespoolne soojusisolatsioon ning vahelaes alla poole toomine on tekitanud suuremat tõenäosust rohkemates kihtides kondensaadi tekkele. Joonisel 42 vertikaalne telg näitab suhtelist õhuniiskust protsentides ja horisontaalnetelg näitab kondensaadiaasta päeva.

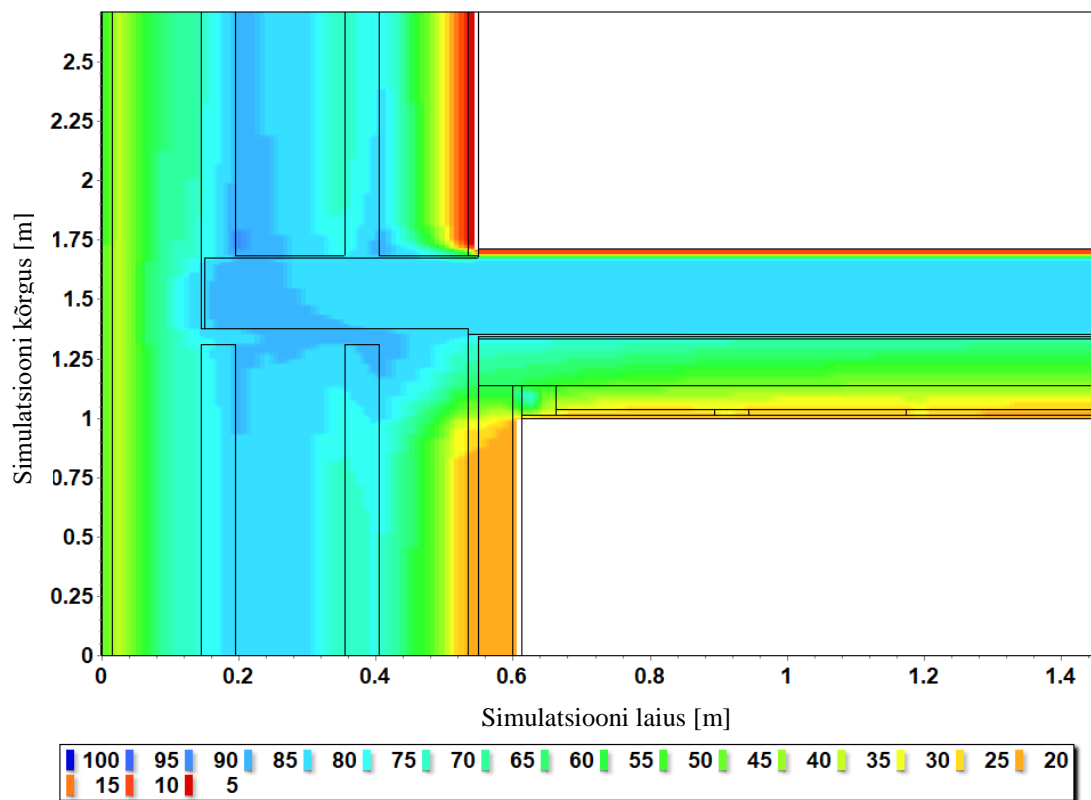


**Joonis 42.** Delphini andurite suhtelised õhuniiskused kondensaadi testaastas.

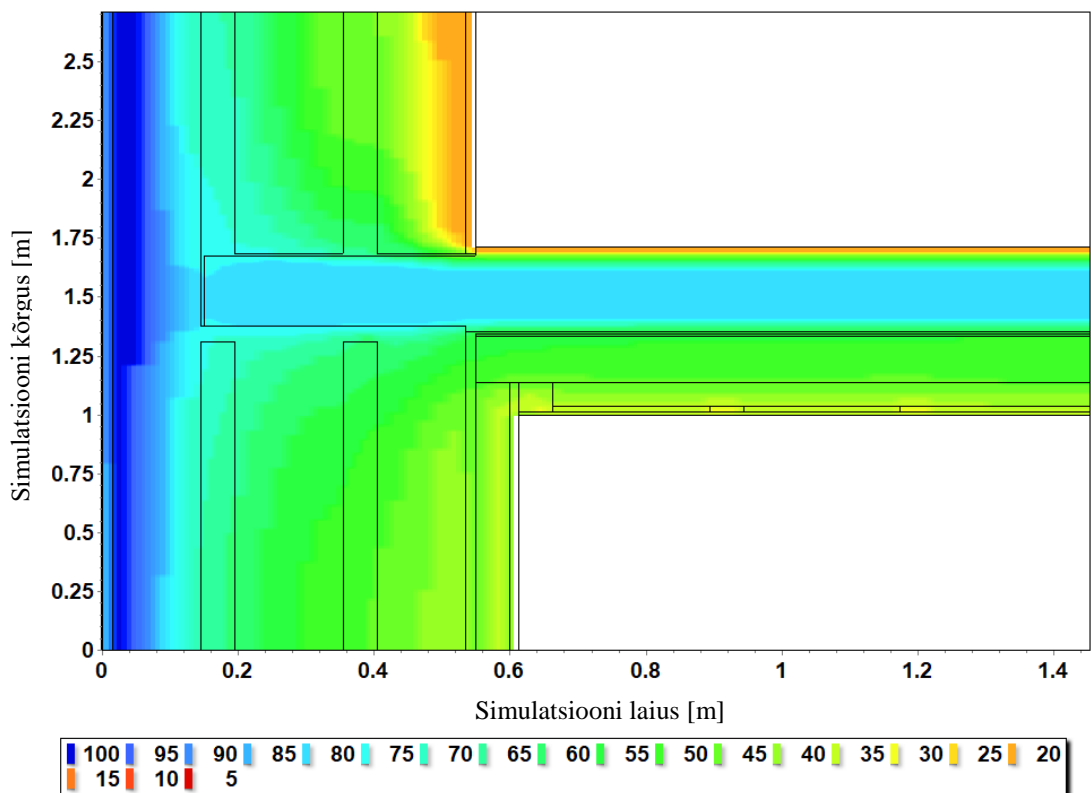
Kondensaaditestaastat kontrolliti vahelaesõlmel 3 erinevat võimalust – olemasolev, aurutõkkega ning soojustamata kujul. Kõigil kolmel juhul ei muutunud andurite asukohtades temperatuuride ja suhteliste õhuniiskuste suurused. Muutused toimusid konstruktsioonis endas.

Terve aasta jooksul on Delphini simulatsiooni järgi vahelaetala niiskus 80 % ligidal ja seda nii välisseina seespoolse ja vahelaesoojustusega, soojustuse ja aurutõkkega kui ka soojustamata vahelaesõlme puhul. Glaseri meetodi järgi kuivab 3 kuu jooksul soojustamata seinast kondensaat välja, siis seda kinnitab ka Delphini simulatsioon. Seespoolse soojusisolatsiooniga seinast Glaseri meetodi järgi kondensaat välja ei kuiva, kuid Delphini simulatsiooni järgi muutub olukord vahelaesuve ja sügise jooksul paremaks – õhuniiskus vahelaes all 50 % ümbruses (vt. Joonis 43, Joonis 44). Soojustatud vahelaes puhul küündis seinas ja vahelaele lisatud soojustuse vahel õhuniiskus talvel ja kevadel 100 % ligidusse (vt. Joonis 45, Joonis 47). Kui külmal perioodil tekkinud kondensaat seinast ja vahelaetala ümbrusest välja ei kuiva, on oht uuel külmaperioodil külmakahjustuste tekkele.

Vertikaalne telg näitab simulatsiooni vaadeldava punkti kõrgust, horisontaalne telg simulatsiooni vaadeldava punkti laiust ning joonise all toodud legendis on näidatud värvidega suhtelise õhuniiskuse sisaldust protsentides.

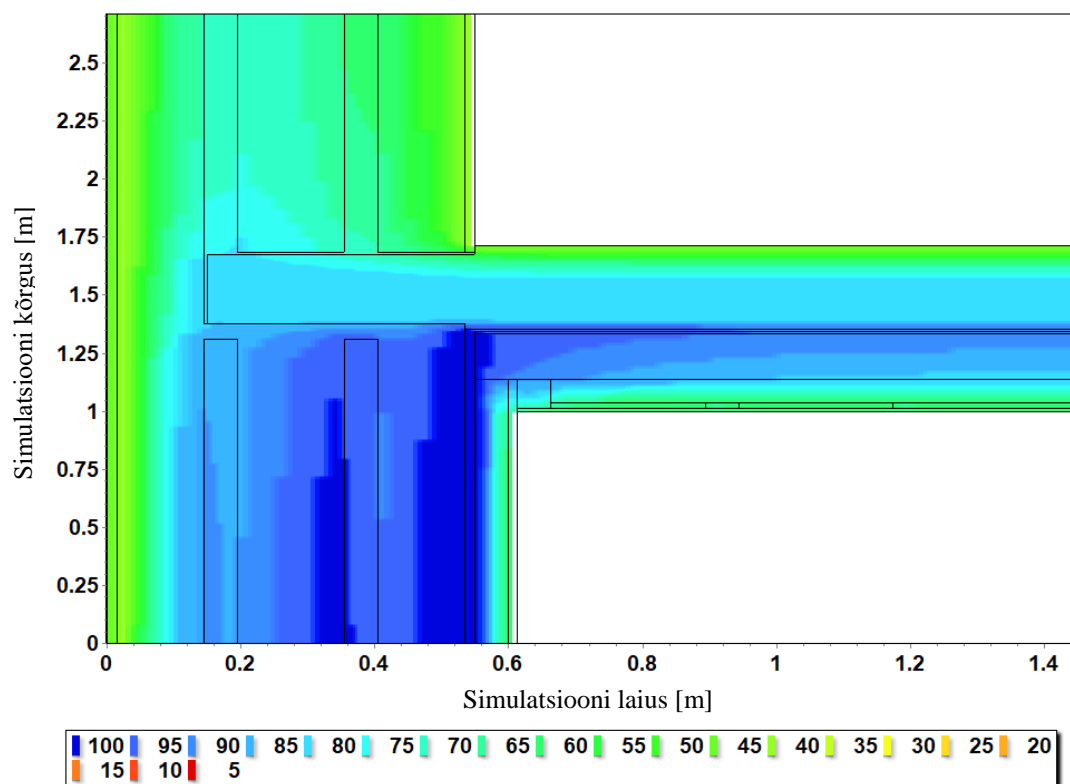


**Joonis 43.** Delphini simulatsioon kondensaaditestaasta suhteline õhuniiskus suve keskpäigas.



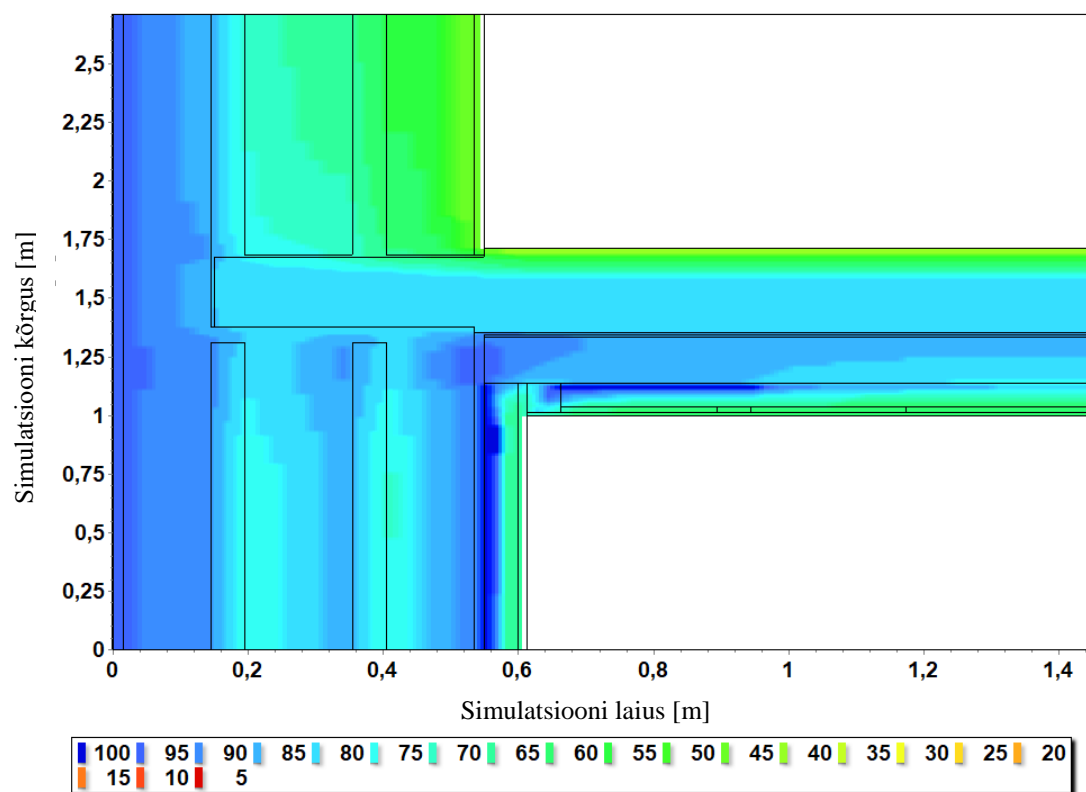
**Joonis 44.** Delphini simulatsioon kondensaaditestaasta suhteline õhuniiskus sügise keskpäigas.



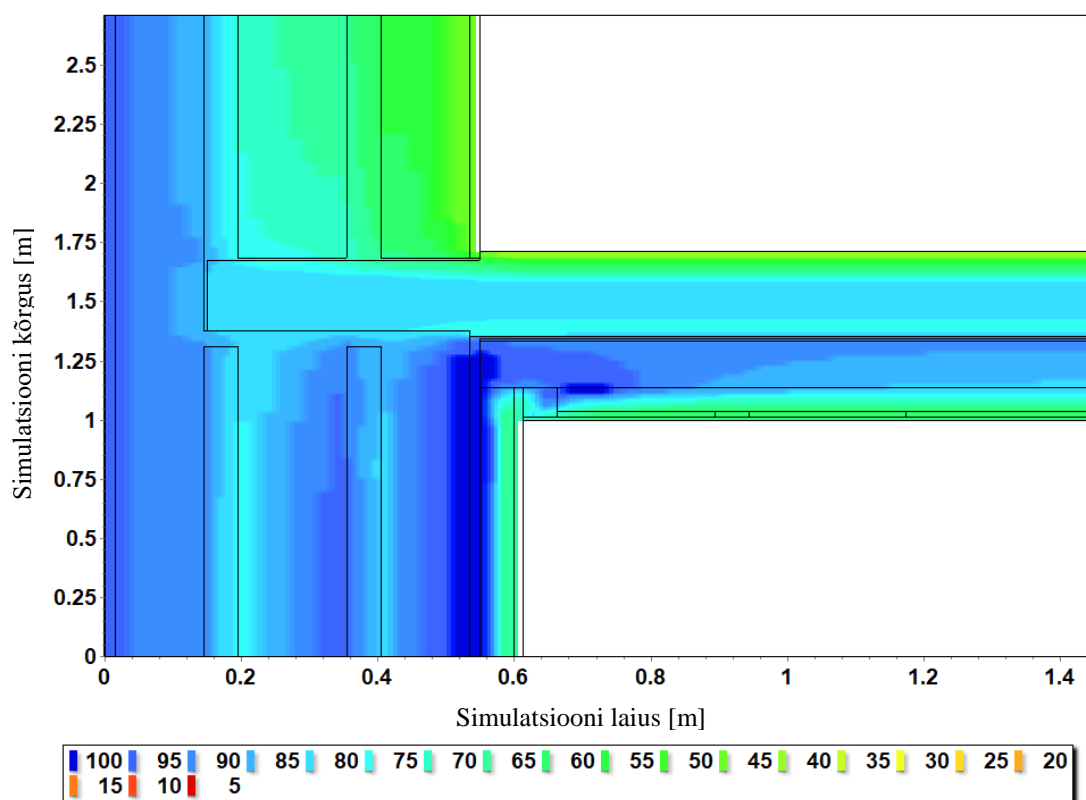


**Joonis 45.** Delphini simulatsioon kondensaaditestaasta suhteline õhuniiskus kevade keskpaigas.

Aurutõkke ja mineraalvillaga soojustatud vahelaesõlme suhtelise õhuniiskuse sisaldus talve keskpaigal oli soojustuse ja seina vahel väiksem, kui aurutõkketa seina puhul (vt. Joonis 46, Joonis 47). Aurutõkke teeb oma tööd külmal perioodil hästi. Temperatuuride osad ei ole külmal perioodil suuri muutusi aurutõkkega või aurutõkketa seinal. Joonisel 46 ja 47 vertikaalne telg näitab simulatsiooni kõrgust meetrites, horisontaalne telg simulatsiooni laiust meetrites ning joonise legendis vastab igale värvile suhteline õhuniiskus protsentides.



**Joonis 46.** Soojustatud vahelaesõlm koos aurutõkkega kondensaadi testaastas talve keskpaigas.



**Joonis 47.** Soojustatud vahelaesõlm aurutõkketa kondensaadi testaastas talve keskpaigas.

Kui talvel ja kevadel (vt. kevade jooniseid lisades 5 - 6) on aurutõkkest kasu, et ei lase siseruumist nii palju niiskust seina sisse, siis suvel ja sügisel on olukord vastupidine. Aurutõkketa ja seespoolse isolatsiooniga vahelaesõlmel on niiskuse sisaldus väiksem mineraalvilla taga, kui aurutõkkega seinal. Selline olukord on tekkinud ilmselt sellest, et aurutõkketa seina puhul ei takista suvel ja sügisel sissepoole kuivamist miski, kuid aurutõkkega seinal on aurutõke kuivamise takistajaks, sest hoiab enda juures suuremat õhuniiskust. Seespoolsel soojustamisel ja aurutõkke kasutamisel on aurutiheda materjali kasutamine probleemiks, sest ei lase kuivada niiskusel sissepoole. Joonised suve ja sügise kohta on lisades 7 - 10. Talve temperatuuri joonised on lisas 11.

#### **4.2.5. Mõõdetud perioodi omakliima tulemused Delphiniga**

Delphiniga kontrolliti kogu vahelaesõlmele ja vahelaetala otstes paigaldatud andurite asukohtades temperatuuri ja õhuniiskuse sisaldust. Andmeid koguti 13.11.2020 kuni 15.03.2021 ning vaatluse alla tulevad täispikkuses päevad (24 h) ehk 14.11.2020 kuni 14.03.2021. Omakliima ja Delphini simulatsiooni soovis autor omavahel võrrelda ja analüüsida, miks ja kas on tulemused erinevad.

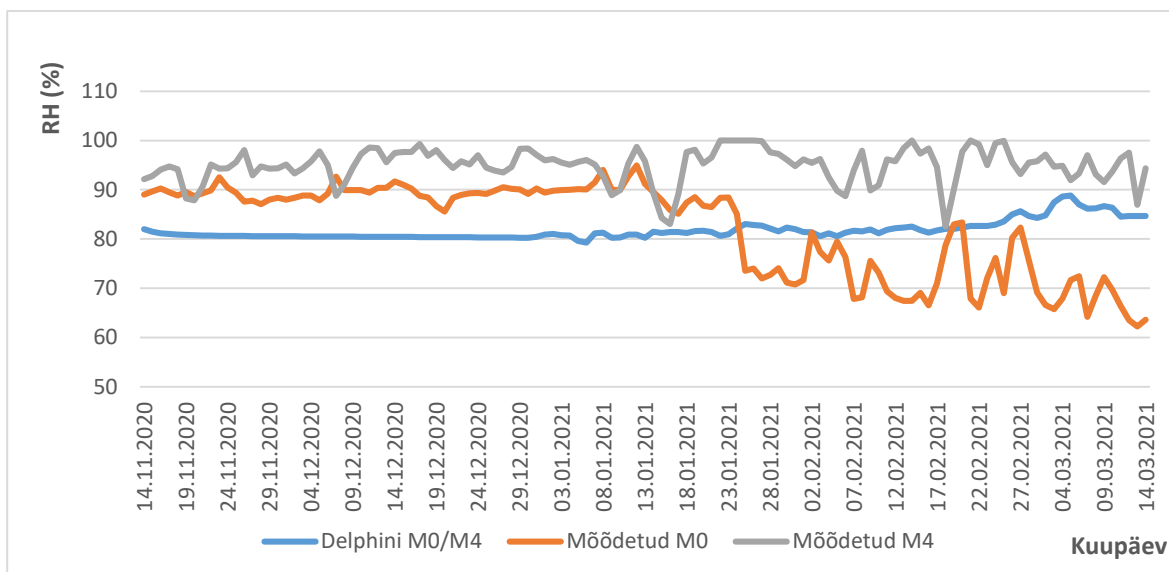
Anduritega mõõtmise perioodi sisse jäi vahemik 07.01 – 22.01.2021, kus köeti II korruse ruumi 24 tunni jooksul vähemalt ühe korra. II korruse ruumi kütmise andmed on lisas 12.

Joonistelt 46 – 53 on selgelt näha, kus on II korruse ruumi köetud, graafikute väärtuste amplituut muutub korraga rohkem. Enne kütmiseperioodi on kõikide andurite suhteliste õhuniiskuste ja temperatuuri graafikud suhteliselt stabiilse algusega. Enne kütmiseperioodi oli II korruse ruumi õhutemperatuur pidevas languses, sest ka välitemperatuur muutus järjest jahedamaks ning kivisein, mis temperatuuri salvestab, jahutas ruumi temperatuuri kiiremini maha. Pärast kütmist muutub ruumi temperatuur soojemaks ning sellega kaasneb ka õhuniiskuse muutus.

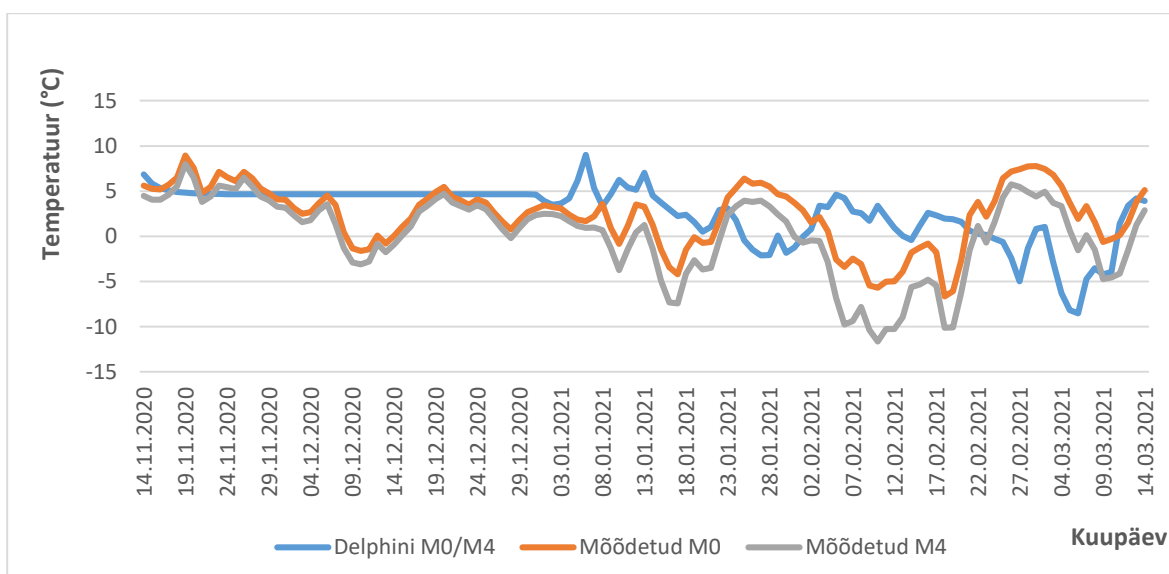
Mõõdetud tulemused ja Delphinist saadud tulemused võivad erineda seetõttu, et Delphini programm sai aru, et on ainult vahelaetala ja selle ümbrus on samuti puit. Reaalsuses on vahelaetala ümber õhuruum ja osaline täide, mis võivad mõjutada talaotstes paigaldatud

andurite tulemusi. Delphini mõõdetud õhuniiskused on pigem stabiilsed ja jäävad väiksemasse vahemikku, kui päriselt mõõdetud õhuniiskust talaotstes. Suure tõenäosusega oleks Delphiniga mõõdetud temperatuurid anduripunktides samuti olnud stabiilsed ja eriliste kõikumisteta, kui ei oleks sisekliima failis olnud temperatuuri järsku tõusu tänu kütmisele.

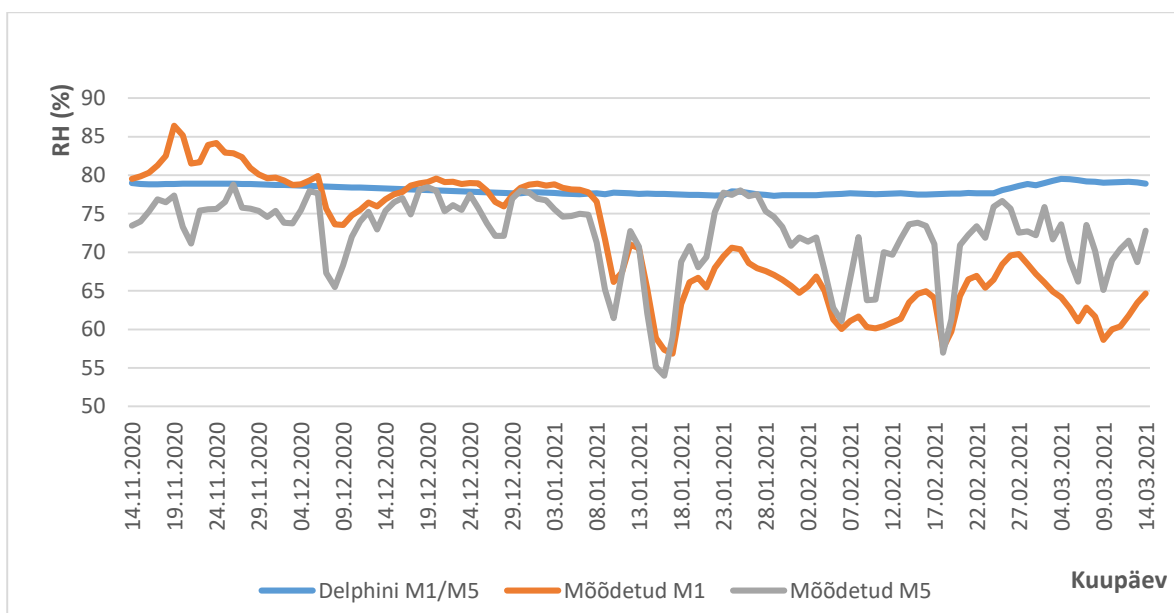
Suhtelise õhuniiskuse joonistel (joonised 48, 50, 52, 54) vertikaalne telg näitab anduri suhtelist õhuniiskust protsentides ning horisontaalne telg näitab kuupäeva. Temperatuuri joonistel (joonised 49, 51, 53, 55) vertikaalne telg näitab anduri temperatuuri kraadides ning horisontaalne telg näitab kuupäeva.



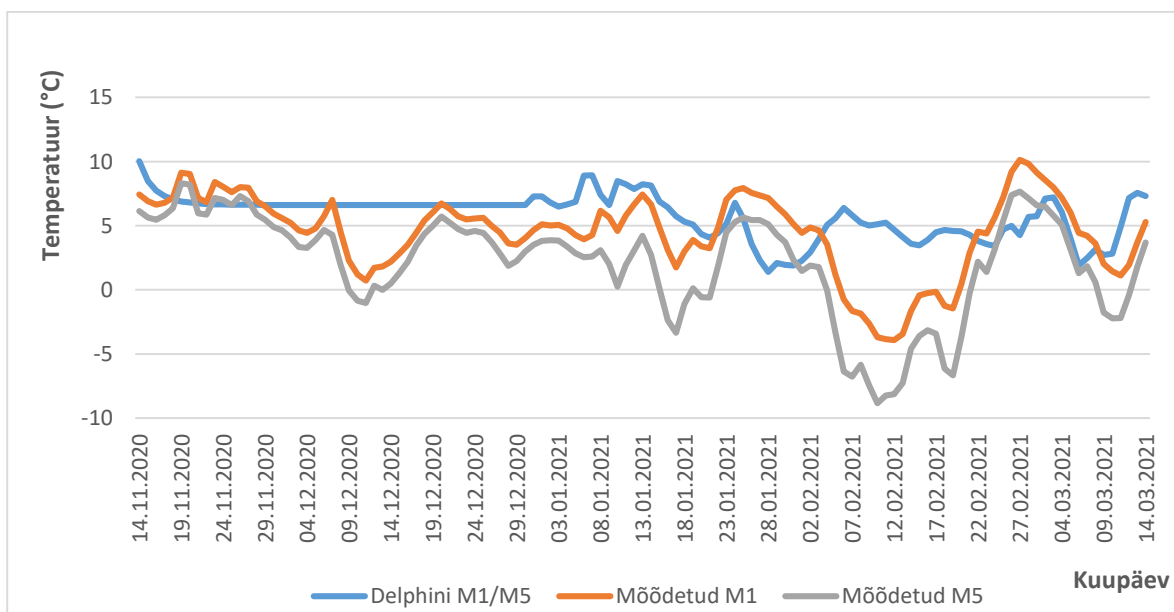
**Joonis 48.** Andurite M0 ja M4 ning Delphini mõõdetud suhteline õhuniiskus talaotsas.



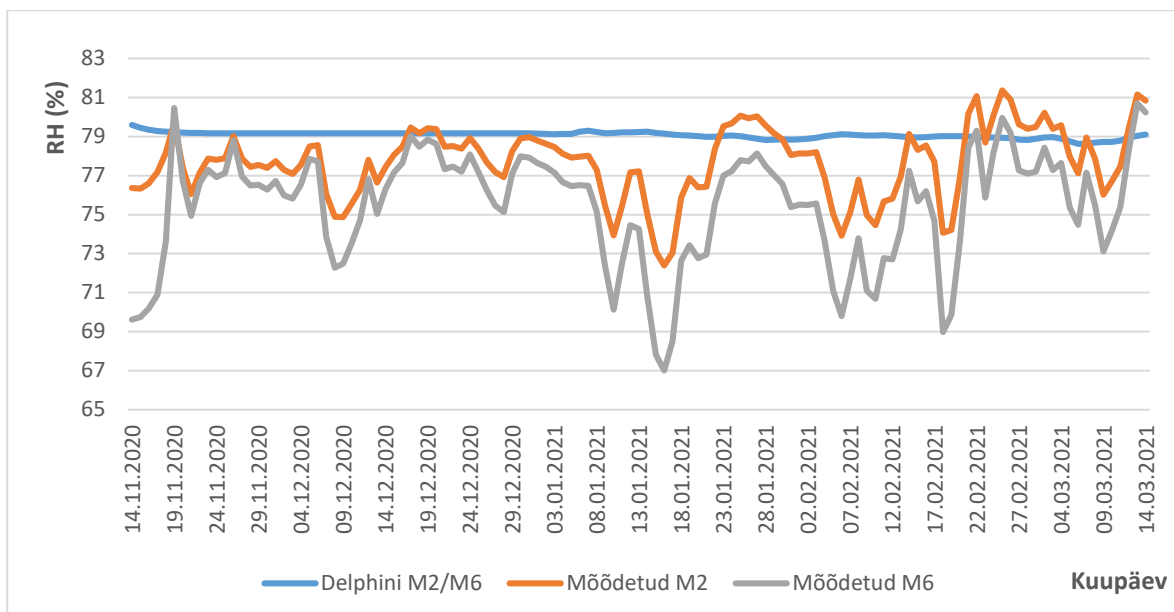
**Joonis 49.** Andurite M0 ja M4 ning Delphini mõõdetud temperatuur talaotsas.



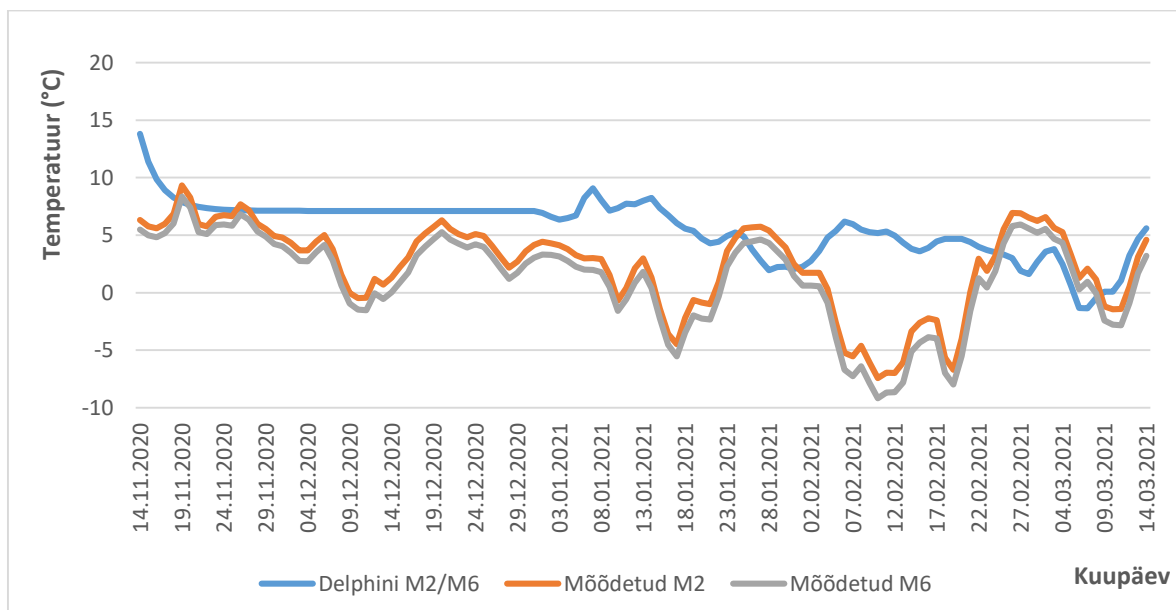
**Joonis 50.** Andurite M1 ja M5 ning Delphini mõõdetud suhteline õhuniiskus talaotsas.



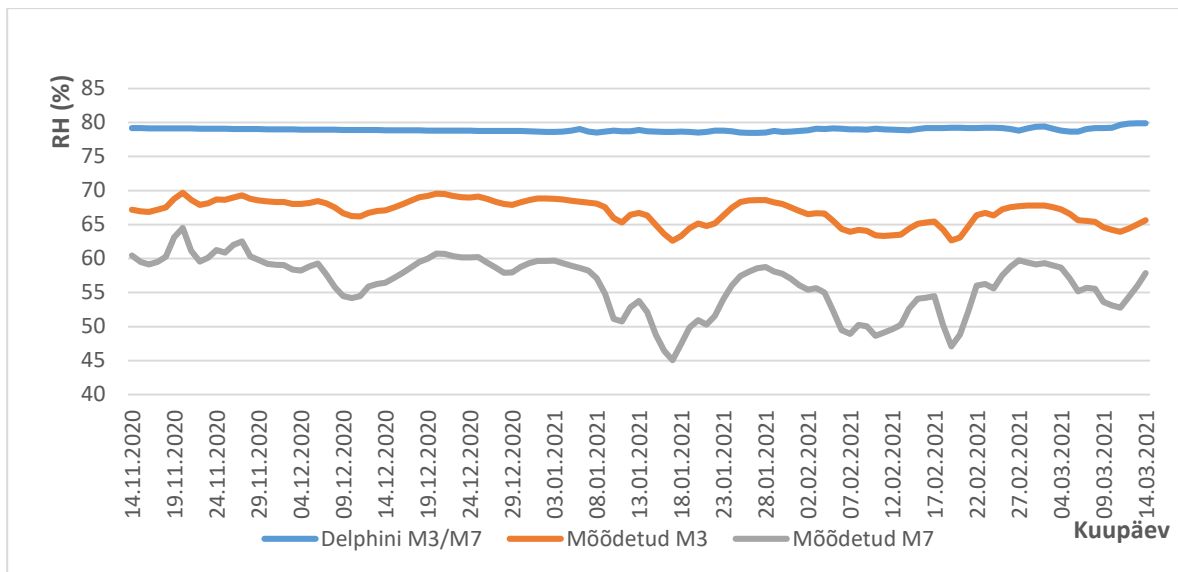
**Joonis 51.** Andurite M1 ja M5 ning Delphini mõõdetud temperatuur talaotsas.



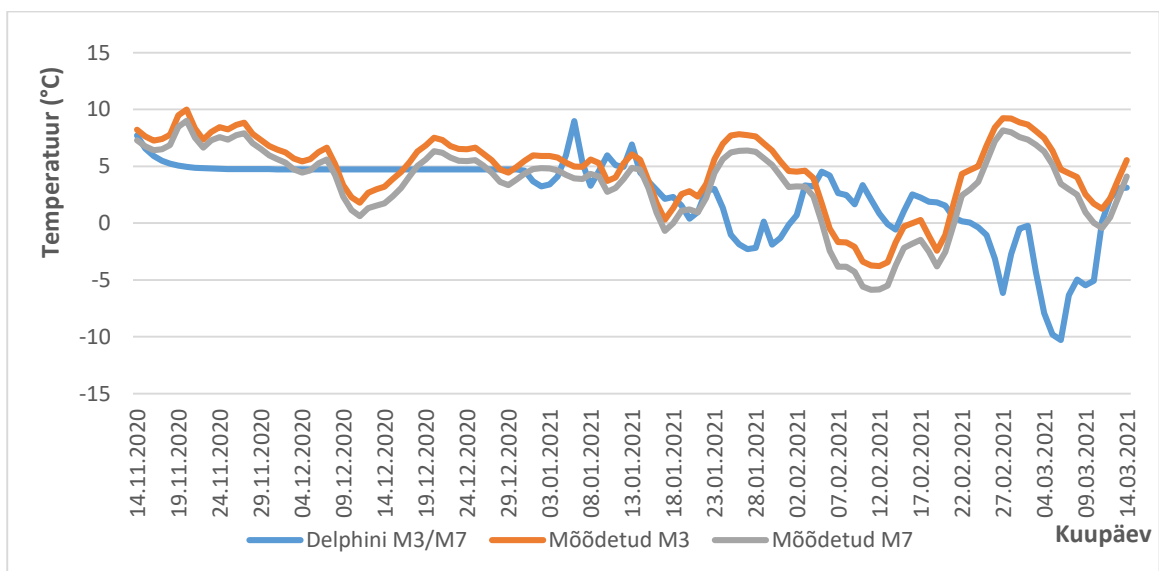
**Joonis 52.** Andurite M2 ja M6 ning Delphini mõõdetud suhteline õhuniiskus talaotsas.



**Joonis 53.** Andurite M2 ja M6 ning Delphini mõõdetud temperatuur talaotsas.

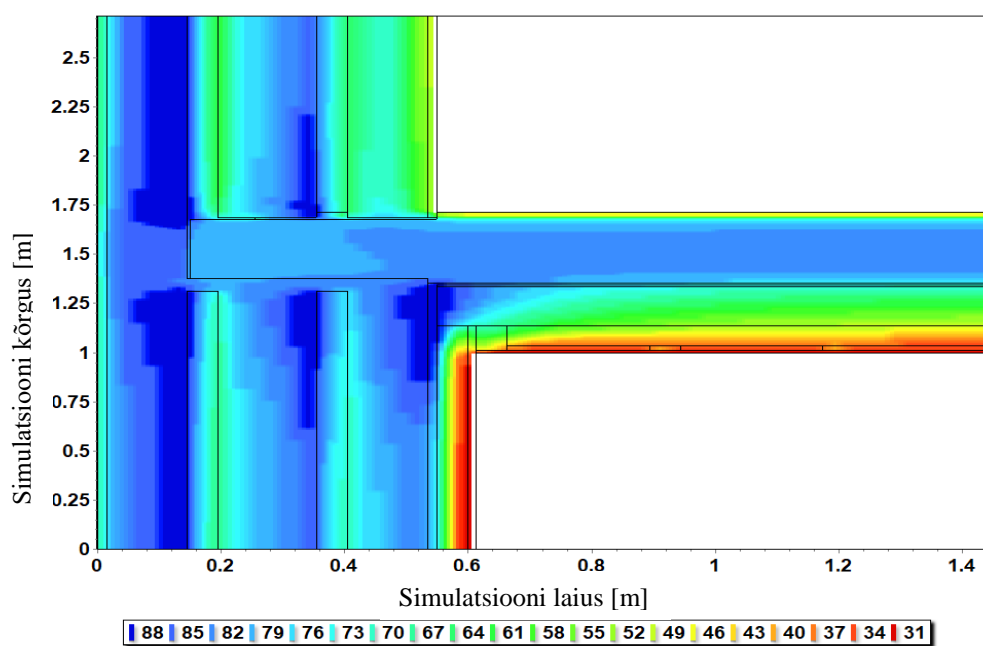


**Joonis 54.** Andurite M3 ja M7 ning Delphini mõõdetud suhteline õhuniiskus talaotsas.

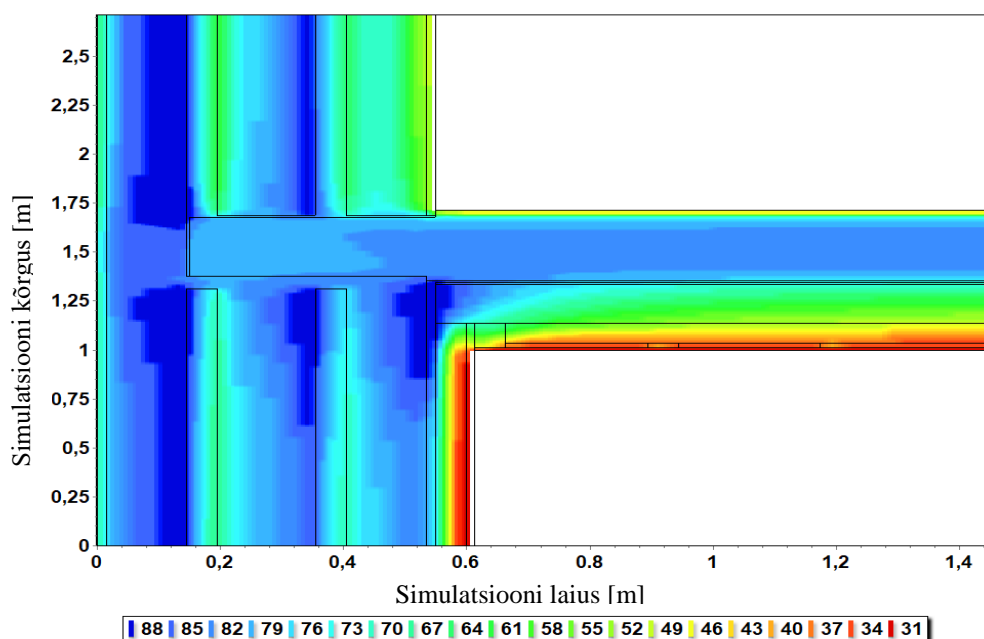


**Joonis 55.** Andurite M3 ja M7 ning Delphini mõõdetud temperatuur talaotsas.

Delphiniga simuleeriti lisaks seespoolse soojusisolatsiooniga seinale ka soojustamata ja tihendatud talaotstega versiooni. Kui talaotsad olid tihendatud suletud pooridega PUR-vahuga, siis saadi niiskuse kogunemise osas väga sarnased tulemused avatud talaotstega. Delphini simulatsiooni on loodud mudel sarnaselt päriselule – PUR-vahtu on lastud II korruse ruumist avatud talade otstesse, kus vaht liigub survejõul puidu pragudesse, täidab tala peal oleva õhkvahe ning tungib ka mingil määral õhkvaheesse. PUR-vahuga tihendatud talaotsa puhul oli näha, et niiskust mõnes kihis on vähem, kui avatud talaotsa puhul (vt. Joonis 56, Joonis 57).



**Joonis 56.** Tihendatud talaots oma kliima perioodil (06.03.2021).



**Joonis 57.** Avatud talaots oma kliima perioodil (06.03.2021).

Tihendatud talaotsa puhul võib niiskust vähem olla, kuid see ei tähenda veel seda, et ka tihendatud talaotsa juurde ei võiks hallitus tekkida. Niiskusesisaldus tihendatud talaotsaga seespoolse soojusisolatsioonisüsteemiga seinas on kohati üle 80 % ning see on hallituse tekkeks ja arenguks piisav.



Tihendatud ja avatud talaotste juures mõõdetud temperatuuris erinevusi ei täheldatud (joonised lisas 13). Temperatuur soojustuse taga on mõlemal juhul üle 10 °C. Kui soojustuse taha on juba hallitusseened tekkinud, siis nende edasi arenguks piisab sellisest temperatuurist ja niiskusest.

### **4.3. Tulemuste kokkuvõte**

Välisseina seespidine soojustamine 50 mm Rockwool SUPERROCK mineraalvillaga parandas välisseina soojusläbivust 2,1 korda. Soojustamata seinä soojusläbivus oli 0,73 W/(m<sup>2</sup>K), pärast soojustamist on seinä soojusläbivus 0,35 W/(m<sup>2</sup>K). Välisseina soojusläbivuse parandamisega tõsteti eluruumis sisepinna temperatuuri ja sellega kasvas ka soojuslik mugavus.

Seespoolne soojusisolatsioonisüsteem ei tee konstruktsioonidele midagi head, kuid samas selgus ka Delphini simulatsioonist, et suve ja sügise perioodil kuivab liigne niiskus suuresti välja. Kui niiskus välja kuivada ei saa ja jääb konstruktsiooni, tekib võimalus hallituse ja külmakahjustuse jms tekkeks. Delphini simulatsioonile vastupidise olukorra andis Glaseri meetodi abil arvutatud seinä kuivamine. Arvutuste kohaselt soojustatud sisepinnaga välissein aurustumise perioodil ära ei kuiva.

Seespoolse soojusisolatsiooni ja aurutõkkega seinä puhul oli näha, et kui aurutõke on paigaldatud seinä sisepinnale lähemale, siis väga palju kasu aurutõkkest siiski ei ole. Aurutõke soojal perioodil ei lase seinä kuivada sissepoole ning hoiab niiskust enda juures. Talaotste tihendamisega suuri erinevusi avatud talaotstega võrreldes ei olnud.

Seespoolse soojusisolatsiooni lisamine I korruse välisseina ei mõjutanud oluliselt seinas ja talaotstes oleva niiskuse ja temperatuuri suurusi. Nii soojustamata kui ka soojustatud vahelaesõlme puhul täheldati, et õhuniiskus on hallituse tekkeks sobilik, aga temperatuur on sealjuures niivõrd madal, et talaotstesse saaks hallitus tekkida.. Delphin andis ainult M3/M7 andurile hallituse tekke võimaluse ja seljuhul jäi samamoodi hallitusindeks alla 1. Teistele anduri asukohtadele Delphin hallitust ei tuvastanud. Talaotstes on niiskust nii palju, et see võib sinna kondenseeruda ja külmal perioodil ära külmuda ning külmakahjustusi tekitada talaotstesse.

I korruse seina soojustamine seepidist ei mõjutanud oluliselt I korruse vahelae ja seina ühenduskohas olevat temperatuuri, kuid langetas seda mitme kraadi võrra II korruse põranda nurgas. Soojustatud ja soojustamata välisseina puhul jäi I korruse temperatuurindeks soovitatust kõrgemale, kuid see-eest oli soovitatust madalam II korruse põranda nurgas ja seda nii soojustatud kui soojustamata I korruse välisseina puhul.

II korruse perioodiline kütmine tekitas Delphini graafikutele kohad, kus on märgata temperatuuride ja õhuniiskuse sisalduste muutuseid. Mõlema korruse ruumide pidev kütmine annaks parema ülevaate seinas ja talaotstes oleva kondenseerunud vee väljakuivamisele.

Kõikide temperatuuride ja suhtelise õhuniiskuse graafikud ajavahemikus 13.11.2020 kuni 15.03.2021 on pandud kokku ühele graafikule ja lisatud lisasse 14. Graafikutelt on näha, et välimises õhkvahes olevate andurite tulemused on rohkem sarnased välikliima andmetele. Sisemises õhkvahes talade peal olevate andurite tulemused, olid kõikuvamad kui samas õhkvahes olevad andurid tala alaserva juures. Selline erinevus võib tulla sellest, et alumised andurid on õhkvahest ~ 30 cm kaugusel ning talade alaservas ei teki suurt õhuvoolu liikumist, kui võrrelda tala ülaserava õhuvoolu liikumisega, mis on suuresti tingitud õhkvahest.

## KOKKUVÕTE

Igapäevaselt muutub hoonete soojustamine ja soojusliku mugavuse tundmine teemakohasemaks. Inimesed tahavad end tunda külmal perioodil toas hästi ja mugavalt, samas ei soovi või ei leia ressursse kogu hoone soojustamiseks. Ehitada võib ju kõike, kuid kas see ka toimib nii nagu peaks. Seespoolse soojustamise üheks suureks miinuseks ongi see, et siis ei toimi sein enam ehitusfüüsikaliselt õigesti. Niiskus ei liigu läbi piirde välja, vaid jääb piirdesse ning võib sellega tekitada palju probleeme.

Antud magistritöö peamiseks osaks oli käsitsi arvutamine Glaseri meetodi järgi ning arvutisimulatsiooniprogrammidega Delphin ja Therm simuleerimine ja nende tulemuste võrdlemine ja analüüsimine mõõdetud tulemustega reaalsel vahelaesõlmel.

Reaalsuses on vaatluse all vaid üks võimalik versioon mineraalvillaga seespoolsest soojustamisest ja seegi ei ole kõige parem lahendus. Arvutiga simuleeriti soojustamata, mineraalvillaga soojustatud, mineraalvillaga soojustatud + tark aurutõke ja ka tihendatud talaotstega vahelaesõlmesid.

Mitte ükski nimetatud lahendusest ei olnud parim. Esmaseks seinas oleva niiskuse ja temperatuuri hindamiseks kasutati Glaseri meetodit. Saadud arvutusi võrreldi Delphini simulatsioonist saadud graafikute ja joonistega. Soojustamata seinal kogunes samuti seina sisse suur kogus niiskust nagu ka soojustatud vahelaesõlmel, ainult selle erinevusega, et soojustamata vahelaesõlmest kuivab suurema tõenäosusega liigne niiskus välja ja lõppkokkuvõttes ei tekita nii palju probleeme kui soojustatud vahelaesõlmel. Delphini simulatsioonist saab järeldada, et suve-sügise perioodi jooksul kuivab suur osa niiskusest soojustatud vahelaesõlmest välja, kuid Glaseri meetodiga arvutades jääb mingi osa niiskusest siiski piirdetarindisse ja sellisel juhul sellist lahendust kasutada ei tohiks.

Simulatsioonis, kus oli kasutatud mineraalvilla ja aurutõket nii seinas kui laes, olid tulemused väga sarnased sõlmele, kus ei olnud kasutatud aurutõket. Aurutõkke paigaldamine sisemisele pinnale ei muuda seespoolse soojustamise efekti paremaks. Õhuniiskus aurutõkkega sõlmel oli küllaltki sama, mis ilma aurutõkketa seinas. Erinevus oli

suurem suve-sügise perioodil, kus õhuniiskus saaks välja kuivada, kuid aurutõke seda hoopis takistas.

Hallituse testaastaga simuleerides soojustatud vahelaesõlmesid, selgus, et hallitust vahelaetalade otstesse tekkida ei tohiks. Delphini simulatsioon andis vahelaetala otstesse anduritele M3/M7 hallitusindeksiks alla 1 ehk hallituse kasv on väike ja tuvastatav mikroskoobi all.

Therm'iga teostati temperatuuriindeksite arvutamine. Enne 2000.aastat ehitatud või rekonstrueeritud hoonete temperatuuriindeksi piirsuurus on  $\geq 0,65$ , kui niiskusklass on 2 või alla selle. Therm'i abil arvutatud temperatuuriindeksid I korrusel nii soojustatud kui soojustamata vahelaesõlme korral olid suuremad kui piirsuurus, seega ohtu hallituse tekkele sein ja vahelaeristumisekohas on väga väike. Kütmata II korruse ruumi temperatuuriindeksid olid kõvasti madalamad kui piirsuurus ning seega on oht hallituse tekkeks põranda ja vahelaeristumisekohas olemas.

Magistritöö tulemused näitavad, et seespoolne soojustamine ei ole ehituskonstruksioonidele hea. Ilma aurutõkketa on suurem võimalus niiskusel välja aurustuda, seda küll pikema perioodi jooksul, kui arvutustes kasutatud. Aurutõkke kasutamisel niiskus seisab aurutõkke juures ning ei kuiva ei sisse- ega väljapoole. Soojustuse lisamisega sisepinnale ja vahelaer alla andis parema tulemuse soojuslähivusele ning suurendati ka soojuslikku mugavust.

Magistritöö eesmärgiks oli uurida soojustuse mõju vahelaetaladele ning tulemuseks saadi, et soojustus ei mõju vahelaetala otstele hallituse poolt hävitavalt, kuid samas võib palju kahjusid tekitada niiskuse kondenseerumine talaotstesse ning seal jäätumine, mida käesoleva magistritöö raames eraldi ei uuritud. Talade niiskusesisaldus oli Delphini simulatsiooni järgi nii hallituse kui ka kondensaaditestaasta jooksul ühtlane, püsidis 80% ligil. Ühtlane niiskusesisaldus puidus on parem lahendus võrreldes sellega, kui puit kuivab ja kahaneb ning siis jälle märgub ja paisub.

Seespidise soojusisolatsioonisüsteemiga vahelaesõlmesid on küll varem uuritud, kuid sellise vahelaesõlme kohta ei leidnud autor ühtegi allikat, seega võiks sellist vahelaesõlme pikemaajaliselt veel uurida. Tulevikus võiks uurida kondenseerumisest tekkivat kahju ning ka olukorda, kus mõlemal korrusel on köetavale eluruumile omane niiskusklass ja kuidas siis vahelaetaladele soojustamine mõjub. Võimaluse korral võiks sellise vahelaesõlme korral reaalsuses uurida mitme erineva soojustusmaterjaliga soojustamist.

## KASUTATUD ALLIKAD

1. **Must, M.** (2016). Vasula kodumajanduskool 1924-1944. Tallinn: Printon kirjastus. 268 lk.
2. **Ahnert, R., Krause, K.H.** (1996). Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960: zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Gründungen, Wände, Decken, Dachtragwerke. Band 1. Berlin: Verlag für Bauwesen. 256 lk.
3. **Veski, A.** (1948). Puusepa- ja laudsepatööd. Tallinn: Pedagoogiline kirjandus. 504 lk.
4. Instruktsioon hoonete ja ehitiste puitelementide kaitse kohta mädanemise, puitu kahjustavate putukate ja süttimise eest : (II 119-56). (1959)./Koost. Eesti NSV Ministrite Nõukogu Riiklik Teaduslik-Tehniline Komitee. Tallinn: Eesti NSV Ministrite Nõukogu Riiklik Teaduslik-Tehniline Komitee. 64 lk.
5. Therm. Tooted. [veebileht]  
<https://www.therm.ee/atf-construction-pro/tooted/termovaht/> (05.11.2020)
6. **Masso, T.** (2012). Ehitusfüüsika ABC: Soojus, niiskus, müra. Tallinn: Ehitame kirjastus. 172 lk.
7. **Puusepp, V.** (2014). Seestpidisel soojustamisel tuleb analüüsida iga juhtumit eraldi. [veebileht] <https://www.soojusaudit.ee/renoveerimine/139-seestpidisel-soojustamisel-tuleb-analueesida-iga-juhtumit-eraldi> (18.02.2021)
8. **Klõšeiko, P., Arumägi, E., Kalamees, T.** (2013). Muinsuskaitse all oleva koolimaja tellistest välisseina seespoolse lisasoojustuse soojus- ja niiskustehnilise toimivuse uuring. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
9. **Kalamees, T., Kõiv, T.-A., Liias, R., Öiger, K., Kallavus, U., Mikli, L., Ilomets, S., Kuusk, K., Maivel, M., Mikola, A., Klõšeiko, P., Agasild, T., Arumärgi, E., Liho, E., Ojang, T., Tuisk, T., Raado, L.-M., Jõesaar, T.** (2010). Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga. Uuringu lõppraport. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
10. **Kams, M.** (2002). Hoone osad. Loengukonspekt. Tartu: Eesti Põllumajanduseülikool.
11. **Jürgenson, L.** (1949). Elamuehitus I. Tartu: Teaduslik Kirjandus. 470 lk.
12. **Veski, A.** (1940). Puitehituse käsiraamat. Tartu: Teaduslik Kirjandus. 264 lk.
13. **Wegerer, P., Bednar, T.** (2018) Improving Durability of Wooden Beam Bearings in Inside Insulated Walls by Tempering the Beam's Heads. – *Proceedings of the 7th International Building Physics Conference, IBPC2018*. Syracuse, NY, USA, pp. 337-342. [on-line]  
<https://surface.syr.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1181&context=ibpc> (24.09.2020)

14. **Kalamees, T., Alev, Ü., Arumägi, E., Ilomets, S., Just, A., Kallavus, U.** (2011). Maaelamute sisekliima, ehitusfüüsika ja energiasääst I. Uuringu I etapi lõpparuanne. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
15. **Vereecken, E., Roels, S.** (2019). Wooden beam ends in combination with interior insulation: An experimental study on the impact of convective moisture transport. – *Building and Environment*. Nr. 148. lk 524-534. [e-ajakiri]  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318306851> (24.09.2020)
16. **Kopecký, P., Staněk, K., Bureš, M., Richter, J., Tywoniak, J.** (2017). Experimental investigations of wooden beam ends in masonry with internal insulation. – *Energy Procedia*. Nr. 132. lk 682-687. [e-ajakiri]  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217349172> (24.09.2020)
17. SA Eesti Mükoloogiauurigute Keskus. Hallitusseentest. [veebileht]  
<http://www.mycology.ee/teenused/hallitusseened/hallitusseentest/> (04.03.2021)
18. **Pilt, K.** Hallitusseened meie ümber. [on-line]  
<http://www.mycology.ee/wp-content/uploads/2017/08/Artikkel.pdf> (04.03.2021)
19. **Konsa, K. Pilt, K.** (2012). Hoonete biokahjustused ja sisekliima. SA Eesti Mükoloogiauurigute Keskus. Tartu: AS Atlex. [on-line] <http://www.mycology.ee/wp-content/uploads/2019/01/Hoonete-biokahjustused-ja-sisekliima.pdf> (04.03.2021)
20. **Pilt, K.** (9.detsember 2015). Hallitus – millal algab probleem? – *Kinnisvara ja Ehitus* (Postimehe teemaleht), lk 6.
21. Terviseamet. Hallitus. [on-line] <https://www.terviseamet.ee/sites/default/files/content-editor/Keskkonnatervis/jutt/hallitus> (04.03.2021)
22. **Kopecký, P., Staněk, K., Bureš, M., Richter, J., Ryparova, P., Tywoniak, J.** (2019) Experimental investigations of wooden beam ends in masonry with interior insulation: Measured data in real-scale experimental walls exposed to semi-continental climatic conditions. - *Journal of Building Physics*. Nr. 43. lk 147-170. [e-ajakiri]  
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1744259119867461> (18.02.2021)
23. Maa-amet. Maa-ameti geoportaal. Aadressiandmed. [on-line]  
<https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo> (05.03.2021)
24. ROCKWOOL OÜ. Tootmisprotsess. [veebileht] <https://www.rockwool.ee/miks-rockwool/vastupidavus/tootmisprotsess/> (05.03.2021)
25. ROCKWOOL OÜ. SUPERROCK. [veebileht]  
<https://www.rockwool.ee/tooted/tooted/ehitusisolatsioon/superrock-1/?selectedCat=dokumendid#Spetsifikatsioonidjasuurused> (05.03.2021)
26. NORDIC FIBREBOARD LTD OÜ. Isotex. [veebileht]  
<https://nordicfibreboard.com/et/tooted/isotex/isotex> (05.03.2021)
27. NORDIC FIBREBOARD LTD OÜ. Toimivusdeklaratsioon. [veebileht]

- [https://nordicfibreboard.com/images/pdf/2015\\_DoP\\_005CPRWF\\_EST.pdf](https://nordicfibreboard.com/images/pdf/2015_DoP_005CPRWF_EST.pdf)  
(05.03.2021)
28. Gyproc. Tootmine. [veebileht]  
<https://www.gyproc.ee/firmast/tootmine> (06.03.2021)
  29. Gyproc. Toimivusdeklaratsioon. [veebileht]  
[https://www.gyproc.ee/sites/gypsum.nordic.master/files/gyproc-site/document-files/et/DoP\\_EE\\_G520\\_Gyproc\\_kipsplaadid.pdf](https://www.gyproc.ee/sites/gypsum.nordic.master/files/gyproc-site/document-files/et/DoP_EE_G520_Gyproc_kipsplaadid.pdf) (06.03.2021)
  30. Ahlborn. ALMEMO® Measuring Instruments. [on-line]  
<https://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap01/eng/2890e.pdf> (06.03.2021)
  31. Ahlborn. Capacitive humidity sensor FHA 646 R, miniature sensor. [on-line]  
<https://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap08/eng/fha646e.pdf> (06.03.2021)
  32. Onset. HOBO® U12-011 Data Logger. [on-line]  
<https://www.onsetcomp.com/datasheet/U12-011> (06.03.2021)
  33. Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisise kondenseerumise vältimine. Arvutusmeetodid. EVS-EN ISO 13788:2012. Eesti standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-13788-2012> (14.03.2021)
  34. Hoonete piirdetarindid ja komponendid. Soojustakistus ja soojuslähivus. Arvutusmeetod. EVS-EN ISO 6946:2017. Eesti standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-6946-2017> (14.03.2021)
  35. National Fenestration Rating Council, Inc. (2017). THERM7/WINDOW7 NFRC Simulation Manual. [on-line]  
<https://windows.lbl.gov/sites/default/files/Downloads/NFRCSim7-July2017.pdf>  
(14.03.2021)
  36. **Klõšeiko, P.** (2017). Therm. [õppematerjal]
  37. Külmasillad hoones. Soojusvoolud ja pinnatemperatuurid. Detailsed arvutused. EVS-EN ISO 10211:2017. Eesti standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-10211-2017> (14.03.2021)
  38. Bauklimatik Dresden. DELPHIN. [on-line] <http://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php> (14.03.2021)
  39. **Kalamees, T., Vinha, J.** (2004). Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations. – *Journal of Thermal Envelope and Building Science*. Nr 27. lk 199-220. [e-ajakiri]  
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1097196304038839> (14.03.2021)
  40. **Masso, T. Rohusaar, J., Mägi, R., Talvik, I., Jaaniso, V., Otsmaa, V., Voltri, V., Loorits, K., Peipman, T., Pukk, O., Õiger, K., Just, E., Just, A., Hartšuk, V.** (2014). Ehituskonstruktori käsiraamat. Tallinn: Ehitame kirjastus. 577 lk.

41. **Kalamees, T.** Ehitusfüüsika II osa. Õppematerjal. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. [veebileht]  
[https://old.taltech.ee/public/p/projektid/BuildEst/Ehitusfuusika\\_II\\_Osa\\_T\\_Kalamees.pdf](https://old.taltech.ee/public/p/projektid/BuildEst/Ehitusfuusika_II_Osa_T_Kalamees.pdf) (14.03.2021)
42. Thermal protection and energy economy in buildings - Part 3: Protection against moisture subject to climate conditions - Requirements, calculation methods and directions for planning and construction. DIN 4108-3:2018-10. Beuth Publishing DIN. [veebileht] <https://www.beuth.de/en/standard/din-4108-3/293137277> (14.03.2021)
43. ROCKWOOL OÜ. Korduma kippuvad küsimused. [veebileht]  
<https://www.rockwool.ee/tehniline-tugi/kkk/> (14.03.2021)
44. Masea. Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung. [veebileht]  
<https://www.masea-ensan.de/> (25.04.2021)
45. Ehitusmaterjalid ja –tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtused ja deklareeritavate ning arvutusväärtuste määramise meetodid. EVS-EN ISO 10456:2008. Eesti standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-10456-2008> (25.04.2021)
46. Purest. PUR vahu ajalugu ja areng. [veebileht] <https://purest.ee/lugemist/pur-vahu-ajalugu-ja-areng> (04.05.2021)
47. Eesti Puitmaja Ehitus. Polüuretaanvaht (PUR). [veebileht]  
<https://eestipuitmaja.ee/polüuretaanvaht-pur/> (04.05.2021)
48. Riigi Ilmateenistus. 01.01.2020 – 28.03.2021 Tartu-Tõravere meteoroloogiajaama kogutud tunni keskmine õhutemperatuur ja –niiskus.
49. Eesti Maaülikool. Ilmajaama andmed. [veebileht] <http://energia.emu.ee/weather/> (14.03.2021)
50. Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. (vastu võetud 03.06.2015, redaktsiooni jõustumise kp 01.07.2015, redaktsiooni kehtivuse lõpp 02.03.2017). *Riigi Teataja*.  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/105062015015> (11.05.2021)
51. Hüdroisolatsioon. Niiskus ehituskonstruktsioonides. [veebileht]  
<http://hydroisolatsioon.edicypages.com/539585162695/niiskuse-kondenseerumine-piiretes> (12.05.2021)
52. **Piirfeld, A.** Soojustatud välisseina hingamine ja selle arvutusmetoodika. Tarmatrade. [veebileht] <http://www.tarmatrade.ee/wp-content/uploads/2017/04/FASSAADIDE-HINGAMISE-ARVUTUS.pdf> (12.05.2021)
53. Muinsuskaitseadus. (Vastu võetud 20.02.2019, viimati jõustunud 01.05.2019). – *Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/110122020022> (17.05.2021).
54. SAINT-GOBAIN EESTI AS. (2014). ISOVER VARIO isolatsioonisüsteem õhutihedaks ja niiskuskindlaks ehitamiseks. [infomaterjal]



**LISAD**

## Lisa 1. Katsevahelae mõõtmistulemused

<b>Kuupäev:</b>	<b>Temp. M0 (°C)</b>	<b>RH M0 (% RH)</b>	<b>Temp. M1 (°C)</b>	<b>RH M1 (% RH)</b>	<b>Temp. M2 (°C)</b>	<b>RH M2 (% RH)</b>	<b>Temp. M3 (°C)</b>	<b>RH M3 (% RH)</b>
14.11.2020	5,61	89,0	7,42	79,5	6,32	76,4	8,21	67,2
15.11.2020	5,27	89,7	6,92	79,9	5,78	76,3	7,61	66,9
16.11.2020	5,17	90,2	6,63	80,3	5,59	76,6	7,27	66,9
17.11.2020	5,70	89,5	6,79	81,3	6,00	77,2	7,40	67,2
18.11.2020	6,48	88,8	7,18	82,5	6,85	78,2	7,78	67,5
19.11.2020	8,94	89,5	9,14	86,4	9,32	79,7	9,50	68,8
20.11.2020	7,56	88,7	9,03	85,2	8,28	77,4	9,98	69,7
21.11.2020	4,81	89,3	7,16	81,5	5,96	76,0	8,32	68,6
22.11.2020	5,47	89,9	6,84	81,7	5,76	77,2	7,35	67,9
23.11.2020	7,14	92,5	8,40	83,9	6,60	77,9	8,01	68,1
24.11.2020	6,53	90,4	8,04	84,2	6,75	77,8	8,44	68,7
25.11.2020	6,12	89,4	7,60	82,9	6,67	77,9	8,26	68,7
26.11.2020	7,15	87,6	8,00	82,8	7,68	79,0	8,65	69,0
27.11.2020	6,44	87,8	7,95	82,3	7,17	77,9	8,85	69,3
28.11.2020	5,30	87,0	6,91	80,9	5,98	77,4	7,84	68,8
29.11.2020	4,77	88,0	6,52	80,1	5,53	77,5	7,31	68,6
30.11.2020	4,10	88,4	5,94	79,6	4,92	77,4	6,77	68,4
01.12.2020	4,06	88,0	5,60	79,7	4,80	77,7	6,47	68,3
02.12.2020	3,14	88,4	5,24	79,3	4,35	77,3	6,23	68,3
03.12.2020	2,50	88,8	4,64	78,8	3,68	77,1	5,67	68,1
04.12.2020	2,68	88,9	4,44	78,8	3,69	77,6	5,42	68,0
05.12.2020	3,67	87,9	4,79	79,3	4,42	78,5	5,62	68,2
06.12.2020	4,51	89,2	5,74	79,9	5,02	78,6	6,24	68,4
07.12.2020	3,49	92,6	7,01	75,7	3,80	76,1	6,64	68,1
08.12.2020	0,43	89,9	4,50	73,6	1,56	74,9	5,17	67,5
09.12.2020	-1,34	89,9	2,27	73,5	-0,03	74,9	3,35	66,7
10.12.2020	-1,60	89,9	1,19	74,8	-0,47	75,6	2,28	66,3
11.12.2020	-1,45	89,4	0,71	75,5	-0,44	76,3	1,80	66,2
12.12.2020	0,08	90,4	1,73	76,5	1,19	77,8	2,68	66,7
13.12.2020	-0,79	90,4	1,83	76,0	0,69	76,6	2,98	67,0
14.12.2020	0,04	91,7	2,18	76,9	1,32	77,4	3,21	67,1
15.12.2020	1,06	91,1	2,85	77,5	2,24	78,1	3,87	67,5
16.12.2020	1,96	90,3	3,52	77,8	3,07	78,5	4,50	68,0
17.12.2020	3,49	88,7	4,44	78,7	4,45	79,5	5,35	68,5
18.12.2020	4,15	88,4	5,42	78,9	5,14	79,2	6,31	69,0
19.12.2020	4,89	86,7	6,04	79,1	5,71	79,4	6,85	69,2
20.12.2020	5,46	85,6	6,74	79,6	6,29	79,4	7,50	69,6
21.12.2020	4,37	88,4	6,31	79,1	5,53	78,5	7,31	69,5

22.12.2020	3,97	88,9	5,73	79,1	5,09	78,5	6,78	69,2
23.12.2020	3,49	89,3	5,50	78,9	4,81	78,4	6,54	69,0
24.12.2020	4,08	89,4	5,56	79,0	5,11	78,9	6,51	69,0
25.12.2020	3,72	89,2	5,62	78,9	4,93	78,4	6,64	69,1
26.12.2020	2,59	89,8	5,00	78,0	4,06	77,7	6,12	68,8
27.12.2020	1,61	90,5	4,47	76,5	3,13	77,2	5,53	68,4
28.12.2020	0,76	90,2	3,62	76,0	2,18	76,9	4,73	68,0
29.12.2020	1,77	90,1	3,52	77,4	2,72	78,3	4,44	67,9
30.12.2020	2,65	89,2	4,04	78,4	3,59	78,9	4,91	68,3
31.12.2020	3,05	90,3	4,66	78,8	4,14	79,0	5,50	68,6
01.01.2021	3,43	89,4	5,11	78,9	4,43	78,8	5,96	68,8
02.01.2021	3,25	89,8	5,01	78,7	4,28	78,6	5,92	68,8
03.01.2021	3,08	89,9	5,07	78,8	4,13	78,5	5,91	68,8
04.01.2021	2,40	90,0	4,80	78,4	3,79	78,1	5,77	68,7
05.01.2021	1,84	90,2	4,26	78,1	3,26	77,9	5,32	68,5
06.01.2021	1,66	90,1	3,95	78,1	2,97	78,0	4,99	68,4
07.01.2021	2,22	91,5	4,27	77,8	3,01	78,0	4,96	68,2
08.01.2021	3,58	94,0	6,17	76,6	2,94	77,3	5,60	68,1
09.01.2021	0,93	90,0	5,67	71,7	1,54	75,5	5,28	67,6
10.01.2021	-0,83	89,9	4,58	66,2	-0,70	73,9	3,72	66,0
11.01.2021	1,14	92,7	5,79	67,4	0,40	75,4	4,01	65,3
12.01.2021	3,51	95,0	6,67	71,0	2,11	77,2	5,25	66,4
13.01.2021	3,26	91,2	7,43	70,5	2,98	77,2	6,05	66,7
14.01.2021	1,25	89,6	6,65	65,2	1,32	75,0	5,56	66,3
15.01.2021	-1,48	87,9	4,87	58,9	-1,40	73,1	3,72	64,9
16.01.2021	-3,42	85,9	3,11	57,4	-3,58	72,4	1,80	63,6
17.01.2021	-4,22	85,1	1,74	56,9	-4,48	73,1	0,32	62,6
18.01.2021	-1,49	87,4	2,99	63,3	-2,19	75,9	1,31	63,3
19.01.2021	-0,09	88,5	3,90	66,1	-0,64	76,9	2,55	64,5
20.01.2021	-0,73	86,7	3,38	66,7	-0,87	76,4	2,80	65,2
21.01.2021	-0,62	86,5	3,25	65,4	-1,01	76,4	2,32	64,8
22.01.2021	1,72	88,4	4,83	68,0	0,92	78,4	3,43	65,2
23.01.2021	4,29	88,5	7,03	69,5	3,63	79,5	5,64	66,3
24.01.2021	5,32	85,1	7,77	70,6	4,75	79,7	6,99	67,5
25.01.2021	6,40	73,6	7,94	70,4	5,59	80,1	7,71	68,3
26.01.2021	5,83	74,0	7,57	68,6	5,67	79,9	7,82	68,6
27.01.2021	5,91	72,0	7,36	67,9	5,75	80,0	7,74	68,6
28.01.2021	5,49	72,7	7,16	67,6	5,41	79,6	7,62	68,6
29.01.2021	4,65	74,1	6,50	67,1	4,65	79,2	7,01	68,3
30.01.2021	4,40	71,1	5,89	66,5	3,92	78,9	6,39	68,0
31.01.2021	3,69	70,8	5,11	65,6	2,49	78,1	5,44	67,5
01.02.2021	2,87	71,6	4,45	64,7	1,72	78,1	4,57	67,0
02.02.2021	1,54	81,3	4,87	65,6	1,73	78,1	4,52	66,5
03.02.2021	2,14	77,4	4,64	66,9	1,73	78,2	4,61	66,6
04.02.2021	0,57	75,6	3,53	65,0	0,32	76,9	3,96	66,6

05.02.2021	-2,56	79,5	1,16	61,3	-2,63	75,0	1,75	65,5
06.02.2021	-3,38	76,3	-0,77	60,0	-5,22	73,9	-0,49	64,3
07.02.2021	-2,47	67,8	-1,64	61,1	-5,55	75,1	-1,67	63,9
08.02.2021	-3,08	68,2	-1,85	61,7	-4,62	76,8	-1,69	64,2
09.02.2021	-5,44	75,5	-2,63	60,3	-6,06	75,0	-2,09	64,1
10.02.2021	-5,70	73,2	-3,70	60,1	-7,42	74,5	-3,39	63,4
11.02.2021	-5,04	69,4	-3,86	60,4	-6,96	75,7	-3,72	63,3
12.02.2021	-4,99	68,0	-3,91	60,9	-6,98	75,8	-3,77	63,4
13.02.2021	-3,91	67,4	-3,45	61,4	-6,07	77,0	-3,45	63,5
14.02.2021	-1,80	67,5	-1,66	63,5	-3,36	79,1	-1,70	64,4
15.02.2021	-1,26	69,0	-0,43	64,6	-2,61	78,3	-0,30	65,1
16.02.2021	-0,82	66,5	-0,26	64,9	-2,24	78,5	0,00	65,3
17.02.2021	-1,75	71,0	-0,15	64,1	-2,40	77,7	0,28	65,4
18.02.2021	-6,66	78,8	-1,26	57,6	-5,65	74,1	-1,14	64,3
19.02.2021	-6,07	83,0	-1,44	59,7	-6,70	74,2	-2,43	62,7
20.02.2021	-2,65	83,4	0,41	64,3	-4,01	76,9	-1,06	63,1
21.02.2021	2,36	67,9	2,89	66,5	0,05	80,2	1,70	64,7
22.02.2021	3,79	66,1	4,53	67,0	2,96	81,1	4,32	66,4
23.02.2021	2,19	72,1	4,39	65,4	1,90	78,7	4,67	66,7
24.02.2021	3,88	76,1	5,66	66,5	3,16	80,1	5,00	66,3
25.02.2021	6,42	69,0	7,22	68,4	5,50	81,4	6,80	67,2
26.02.2021	7,18	80,3	9,21	69,6	6,93	80,9	8,42	67,6
27.02.2021	7,41	82,3	10,13	69,8	6,90	79,6	9,22	67,7
28.02.2021	7,73	75,7	9,84	68,5	6,51	79,4	9,21	67,8
01.03.2021	7,78	69,1	9,12	67,2	6,24	79,5	8,87	67,8
02.03.2021	7,45	66,6	8,56	66,1	6,58	80,2	8,66	67,8
03.03.2021	6,83	65,8	7,98	64,9	5,64	79,4	8,12	67,6
04.03.2021	5,59	67,9	7,18	64,1	5,27	79,6	7,49	67,2
05.03.2021	3,68	71,7	6,04	62,8	3,31	78,0	6,35	66,6
06.03.2021	1,91	72,5	4,43	61,1	1,28	77,1	4,73	65,6
07.03.2021	3,35	64,2	4,20	62,8	2,09	79,0	4,39	65,5
08.03.2021	1,56	68,5	3,61	61,7	1,14	77,9	4,04	65,4
09.03.2021	-0,64	72,3	2,01	58,6	-1,20	76,0	2,54	64,6
10.03.2021	-0,31	69,7	1,44	60,0	-1,45	76,7	1,72	64,2
11.03.2021	0,11	66,4	1,12	60,4	-1,42	77,5	1,27	63,9
12.03.2021	1,49	63,6	1,95	61,8	0,50	79,4	2,18	64,4
13.03.2021	3,81	62,3	3,68	63,4	3,12	81,2	3,88	65,0
14.03.2021	5,11	63,6	5,29	64,7	4,59	80,9	5,56	65,6

<b>Kuupäev:</b>	<b>Temp. M4 (°C)</b>	<b>RH M4 (% RH)</b>	<b>Temp. M5 (°C)</b>	<b>RH M5 (% RH)</b>	<b>Temp. M6 (°C)</b>	<b>RH M6 (% RH)</b>	<b>Temp. M7 (°C)</b>	<b>RH M7 (% RH)</b>
14.11.2020	4,49	92,1	6,13	73,5	5,48	69,6	7,28	60,5
15.11.2020	4,06	92,8	5,63	74,0	4,99	69,7	6,75	59,5
16.11.2020	4,05	94,1	5,47	75,3	4,82	70,2	6,42	59,2
17.11.2020	4,62	94,7	5,80	76,9	5,19	70,9	6,51	59,5
18.11.2020	5,54	94,2	6,36	76,5	6,01	73,6	6,87	60,2
19.11.2020	7,97	88,3	8,31	77,3	8,35	80,5	8,48	63,1
20.11.2020	6,51	87,9	8,20	73,3	7,40	76,7	9,00	64,5
21.11.2020	3,82	90,7	5,97	71,1	5,26	74,9	7,53	61,2
22.11.2020	4,40	95,1	5,87	75,4	5,11	76,6	6,65	59,6
23.11.2020	5,60	94,3	7,16	75,6	5,88	77,3	7,30	60,1
24.11.2020	5,44	94,4	7,01	75,6	5,95	76,9	7,56	61,2
25.11.2020	5,22	95,6	6,60	76,5	5,83	77,1	7,35	60,9
26.11.2020	6,49	98,1	7,32	78,8	6,83	78,8	7,73	62,0
27.11.2020	5,49	92,9	6,91	75,8	6,34	77,0	7,90	62,5
28.11.2020	4,41	94,8	5,86	75,6	5,31	76,5	7,03	60,3
29.11.2020	3,99	94,3	5,46	75,4	4,88	76,5	6,53	59,8
30.11.2020	3,26	94,3	4,88	74,6	4,24	76,3	5,98	59,2
01.12.2020	3,15	95,1	4,64	75,4	4,05	76,7	5,62	59,1
02.12.2020	2,33	93,3	4,10	73,8	3,49	76,0	5,32	59,0
03.12.2020	1,56	94,4	3,34	73,7	2,75	75,8	4,73	58,4
04.12.2020	1,78	95,8	3,27	75,5	2,73	76,5	4,44	58,3
05.12.2020	2,87	97,8	3,90	77,9	3,50	77,9	4,65	58,8
06.12.2020	3,57	95,0	4,66	77,6	4,15	77,7	5,27	59,3
07.12.2020	1,34	88,7	4,29	67,3	2,81	73,9	5,61	57,7
08.12.2020	-1,31	91,1	1,95	65,5	0,65	72,3	4,23	55,8
09.12.2020	-2,90	94,5	-0,07	68,4	-0,94	72,5	2,33	54,5
10.12.2020	-3,09	97,3	-0,85	72,0	-1,48	73,6	1,16	54,2
11.12.2020	-2,80	98,6	-1,03	74,0	-1,54	74,7	0,61	54,5
12.12.2020	-0,84	98,5	0,31	75,2	-0,06	76,8	1,32	55,9
13.12.2020	-1,76	95,6	-0,01	73,0	-0,57	75,0	1,54	56,3
14.12.2020	-0,90	97,5	0,49	75,4	0,02	76,3	1,73	56,4
15.12.2020	0,10	97,7	1,32	76,5	0,90	77,2	2,37	57,1
16.12.2020	1,06	97,7	2,19	77,0	1,77	77,7	3,10	57,9
17.12.2020	2,73	99,3	3,43	74,9	3,27	79,0	4,09	58,7
18.12.2020	3,37	96,9	4,36	78,1	4,00	78,5	5,04	59,5
19.12.2020	4,11	98,0	4,98	78,4	4,64	78,8	5,61	60,0
20.12.2020	4,70	96,0	5,72	78,0	5,27	78,6	6,32	60,7
21.12.2020	3,74	94,4	5,23	75,3	4,63	77,3	6,20	60,7
22.12.2020	3,35	95,8	4,73	76,1	4,26	77,5	5,76	60,3
23.12.2020	2,94	95,1	4,43	75,5	3,93	77,2	5,50	60,2
24.12.2020	3,46	97,0	4,59	77,5	4,20	78,1	5,45	60,2

25.12.2020	2,99	94,5	4,43	75,7	3,98	77,2	5,54	60,2
26.12.2020	1,90	93,9	3,72	73,7	3,11	76,2	5,08	59,4
27.12.2020	0,74	93,5	2,81	72,1	2,14	75,5	4,44	58,7
28.12.2020	-0,19	94,6	1,87	72,1	1,21	75,1	3,62	57,9
29.12.2020	0,91	98,3	2,23	76,9	1,73	77,1	3,36	58,0
30.12.2020	1,89	98,4	2,98	78,0	2,54	78,0	3,83	58,8
31.12.2020	2,33	97,1	3,52	77,7	3,03	77,9	4,36	59,3
01.01.2021	2,49	96,0	3,81	76,9	3,32	77,7	4,75	59,7
02.01.2021	2,46	96,3	3,86	76,7	3,28	77,4	4,83	59,7
03.01.2021	2,26	95,5	3,84	75,6	3,15	77,1	4,82	59,7
04.01.2021	1,66	95,1	3,37	74,6	2,74	76,7	4,63	59,3
05.01.2021	1,15	95,7	2,84	74,7	2,26	76,5	4,25	58,9
06.01.2021	0,93	96,1	2,55	75,0	2,00	76,5	3,94	58,6
07.01.2021	0,97	95,1	2,59	74,9	1,98	76,5	3,88	58,2
08.01.2021	0,70	92,8	3,09	71,3	1,79	75,2	4,32	57,1
09.01.2021	-1,32	88,9	2,02	65,2	0,50	72,4	4,11	54,9
10.01.2021	-3,75	90,0	0,23	61,5	-1,59	70,1	2,76	51,2
11.01.2021	-1,44	95,3	1,94	67,3	-0,59	72,5	3,10	50,7
12.01.2021	0,43	98,7	3,08	72,8	0,86	74,5	3,87	52,8
13.01.2021	1,26	95,8	4,22	70,7	1,82	74,3	4,87	53,8
14.01.2021	-1,36	89,3	2,72	62,1	0,39	70,8	4,70	52,1
15.01.2021	-4,91	84,3	0,11	55,1	-2,22	67,8	3,06	48,8
16.01.2021	-7,33	83,0	-2,37	54,0	-4,53	67,0	0,93	46,4
17.01.2021	-7,44	89,1	-3,34	59,0	-5,53	68,5	-0,68	45,1
18.01.2021	-4,13	97,7	-1,11	68,8	-3,49	72,6	-0,01	47,5
19.01.2021	-2,65	98,1	0,12	70,8	-1,99	73,4	1,10	49,9
20.01.2021	-3,68	95,3	-0,59	68,0	-2,25	72,8	1,21	51,0
21.01.2021	-3,50	96,6	-0,61	69,4	-2,33	72,9	0,95	50,3
22.01.2021	-0,44	100,0	1,84	75,2	-0,33	75,6	2,22	51,6
23.01.2021	2,38	100,0	4,48	77,8	2,28	77,0	4,42	54,1
24.01.2021	3,31	100,0	5,29	77,4	3,48	77,2	5,62	56,0
25.01.2021	3,95	100,0	5,64	78,0	4,33	77,8	6,23	57,5
26.01.2021	3,80	100,0	5,44	77,3	4,47	77,7	6,37	58,1
27.01.2021	3,94	99,9	5,44	77,5	4,64	78,1	6,38	58,6
28.01.2021	3,32	97,6	5,10	75,3	4,33	77,5	6,28	58,7
29.01.2021	2,42	97,3	4,29	74,6	3,61	77,0	5,72	58,1
30.01.2021	1,63	96,1	3,70	73,3	2,86	76,6	5,13	57,8
31.01.2021	-0,05	94,8	2,32	70,8	1,45	75,4	4,17	57,0
01.02.2021	-0,69	96,2	1,47	71,9	0,62	75,5	3,18	56,1
02.02.2021	-0,45	95,5	1,90	71,4	0,61	75,5	3,24	55,4
03.02.2021	-0,50	96,2	1,76	71,9	0,56	75,6	3,21	55,6
04.02.2021	-2,87	92,6	-0,05	67,6	-0,88	73,7	2,35	55,0
05.02.2021	-6,81	89,8	-3,36	62,8	-3,93	71,1	0,08	52,3
06.02.2021	-9,77	88,7	-6,37	61,1	-6,71	69,8	-2,43	49,5
07.02.2021	-9,39	93,9	-6,76	66,6	-7,26	71,7	-3,83	48,9

08.02.2021	-7,82	97,9	-5,85	72,0	-6,39	73,8	-3,83	50,3
09.02.2021	-10,37	89,9	-7,45	63,8	-7,86	71,1	-4,28	50,1
10.02.2021	-11,63	90,9	-8,85	63,8	-9,19	70,7	-5,58	48,6
11.02.2021	-10,28	96,2	-8,23	70,0	-8,68	72,8	-5,86	49,1
12.02.2021	-10,25	95,8	-8,16	69,7	-8,67	72,7	-5,84	49,6
13.02.2021	-8,96	98,5	-7,28	71,8	-7,82	74,2	-5,50	50,2
14.02.2021	-5,63	100,0	-4,61	73,6	-5,12	77,3	-3,73	52,6
15.02.2021	-5,32	97,3	-3,61	73,9	-4,33	75,7	-2,18	54,1
16.02.2021	-4,79	98,4	-3,16	73,4	-3,87	76,2	-1,80	54,2
17.02.2021	-5,45	94,6	-3,41	71,1	-3,98	74,7	-1,47	54,5
18.02.2021	-10,13	82,5	-6,15	57,0	-6,97	69,0	-2,50	50,2
19.02.2021	-10,10	90,2	-6,68	61,3	-7,99	69,9	-3,81	47,1
20.02.2021	-6,18	97,7	-3,73	70,9	-5,52	73,7	-2,54	48,8
21.02.2021	-1,55	100,0	-0,29	72,3	-1,59	78,4	-0,13	52,3
22.02.2021	1,16	99,2	2,20	73,4	1,26	79,3	2,46	56,0
23.02.2021	-0,71	95,0	1,38	71,9	0,44	75,9	2,94	56,2
24.02.2021	1,57	99,5	3,19	75,9	1,86	78,2	3,62	55,6
25.02.2021	4,31	100,0	5,39	76,6	4,30	80,0	5,42	57,5
26.02.2021	5,77	95,6	7,37	75,7	5,79	79,2	7,22	58,8
27.02.2021	5,46	93,2	7,65	72,5	5,93	77,3	8,16	59,8
28.02.2021	4,91	95,5	7,14	72,7	5,56	77,1	7,99	59,4
01.03.2021	4,40	95,8	6,59	72,2	5,22	77,2	7,56	59,1
02.03.2021	4,92	97,1	6,47	75,9	5,55	78,4	7,36	59,3
03.03.2021	3,68	94,7	5,80	71,7	4,69	77,3	6,89	59,0
04.03.2021	3,34	94,8	5,09	73,6	4,35	77,6	6,30	58,6
05.03.2021	0,64	92,0	3,17	69,0	2,33	75,4	5,14	57,0
06.03.2021	-1,54	93,3	1,30	66,2	0,28	74,5	3,46	55,2
07.03.2021	0,11	97,0	1,85	73,5	0,95	77,2	2,99	55,7
08.03.2021	-1,47	93,1	0,60	70,2	-0,06	75,5	2,50	55,6
09.03.2021	-4,75	91,6	-1,77	65,1	-2,41	73,1	0,96	53,6
10.03.2021	-4,56	93,7	-2,22	69,0	-2,78	74,2	0,03	53,1
11.03.2021	-4,12	96,4	-2,20	70,4	-2,83	75,4	-0,43	52,8
12.03.2021	-1,54	97,6	-0,41	71,5	-0,93	78,3	0,49	54,3
13.03.2021	1,23	86,9	1,79	68,7	1,71	80,7	2,31	56,0
14.03.2021	2,88	94,3	3,69	72,8	3,22	80,2	4,10	57,8

<b>Kuupäev:</b>	<b>Temp. 1.korruse toas (°C)</b>	<b>RH 1.korruse toas (%RH)</b>	<b>Temp. 2.korruse toas (°C)</b>	<b>RH 2.korruse toas (%RH)</b>	<b>Temp. väljas (°C)</b>	<b>RH väljas (%RH)</b>
14.11.2020	19.03	45.3	9.89	75.1	1.41	87.0
15.11.2020	20.66	43.9	9.52	75.2	1.20	88.4
16.11.2020	20.34	45.6	9.28	73.8	2.80	83.1
17.11.2020	20.97	46.9	9.28	73.5	2.80	90.7
18.11.2020	21.91	48.4	9.65	76.5	8.30	95.4
19.11.2020	22.13	49.1	10.95	80.9	8.85	86.2
20.11.2020	22.07	44.2	10.25	72.6	1.30	89.6
21.11.2020	19.28	41.6	9.46	73.3	0.65	92.9
22.11.2020	18.38	43.8	11.01	70.3	3.95	93.5
23.11.2020	20.06	48.8	12.37	67.6	4.95	87.1
24.11.2020	20.51	47.2	10.42	68.0	3.95	84.7
25.11.2020	20.48	46.4	10.11	71.2	4.65	94.6
26.11.2020	21.18	47.5	10.13	73.7	5.57	93.7
27.11.2020	20.26	44.5	9.78	72.1	0.90	94.2
28.11.2020	19.61	41.9	9.05	71.0	1.45	90.1
29.11.2020	20.12	41.1	8.90	72.1	0.15	89.3
30.11.2020	20.65	43.2	8.37	70.8	-0.33	95.7
01.12.2020	20.48	42.9	7.87	70.6	0.56	93.7
02.12.2020	20.62	39.9	7.64	71.7	-1.62	88.8
03.12.2020	20.06	38.8	7.16	71.0	-1.38	86.8
04.12.2020	19.94	39.4	6.90	70.6	0.50	82.8
05.12.2020	18.73	40.4	7.28	73.0	2.52	86.6
06.12.2020	21.76	43.6	9.95	72.4	1.91	77.7
07.12.2020	21.42	37.4	12.75	68.0	-1.40	52.3
08.12.2020	19.55	34.9	8.79	65.2	-5.39	63.8
09.12.2020	19.51	35.6	6.22	64.1	-5.23	64.3
10.12.2020	19.18	35.9	4.91	64.6	-5.81	74.0
11.12.2020	20.66	37.2	4.20	65.5	-2.60	90.0
12.12.2020	21.55	38.0	4.92	70.4	-2.60	88.9
13.12.2020	20.95	36.9	5.01	69.3	-3.98	89.7
14.12.2020	20.24	37.6	5.20	69.7	-2.60	94.4
15.12.2020	20.25	38.8	5.48	70.6	-0.78	93.3
16.12.2020	21.22	39.6	5.93	71.1	0.94	93.4
17.12.2020	21.18	44.6	6.72	73.8	3.71	93.7
18.12.2020	20.94	44.8	7.49	74.4	2.41	96.3
19.12.2020	19.84	45.5	8.08	76.2	4.53	98.0
20.12.2020	19.41	42.2	8.54	75.3	1.45	95.3
21.12.2020	19.54	40.1	7.99	71.9	0.30	95.0
22.12.2020	20.37	41.9	7.55	71.6	0.73	93.1
23.12.2020	20.68	42.0	7.54	72.9	0.37	94.0
24.12.2020	20.33	42.8	7.73	74.3	1.79	95.8



25.12.2020	21.30	41.4	7.82	73.7	-0.60	96.8
26.12.2020	20.62	38.3	7.54	72.8	-2.00	95.8
27.12.2020	19.94	35.8	7.30	73.0	-2.24	89.6
28.12.2020	19.15	35.0	6.48	70.7	-1.51	82.7
29.12.2020	20.58	37.7	6.15	70.4	0.20	91.7
30.12.2020	20.57	38.5	6.49	72.3	2.17	88.9
31.12.2020	20.89	39.5	7.08	74.4	0.76	97.2
01.01.2021	21.47	41.1	7.47	73.5	-0.02	94.2
02.01.2021	20.77	41.9	7.40	71.8	0.03	97.0
03.01.2021	20.24	44.0	7.43	71.4	-0.88	93.3
04.01.2021	20.59	42.3	7.29	70.9	-1.97	91.2
05.01.2021	20.47	38.3	6.91	70.3	-1.90	92.3
06.01.2021	21.00	37.3	6.63	70.4	-1.87	93.1
07.01.2021	22.03	36.7	8.88	69.4	-2.85	89.7
08.01.2021	20.47	33.2	11.59	66.7	-4.30	86.6
09.01.2021	20.64	32.2	13.90	61.1	-9.18	88.5
10.01.2021	20.77	35.0	15.35	55.7	-8.57	87.0
11.01.2021	21.32	34.4	16.42	52.9	-3.43	86.9
12.01.2021	21.30	35.4	13.85	53.3	-1.65	88.4
13.01.2021	19.85	38.0	16.22	51.9	-3.20	89.2
14.01.2021	19.84	32.7	17.28	46.8	-10.46	85.0
15.01.2021	18.53	28.3	16.46	43.6	-15.30	85.3
16.01.2021	18.26	27.4	14.39	42.7	-17.88	83.0
17.01.2021	19.89	31.6	13.47	41.7	-11.91	87.8
18.01.2021	18.53	31.8	11.57	43.3	-7.32	88.8
19.01.2021	18.70	31.3	12.00	44.1	-7.03	86.4
20.01.2021	18.66	28.9	8.92	46.0	-7.62	73.8
21.01.2021	19.63	29.6	13.17	44.6	-5.44	91.0
22.01.2021	20.02	32.6	13.31	45.5	2.18	86.5
23.01.2021	21.10	35.0	14.88	46.7	1.15	92.5
24.01.2021	22.21	40.6	12.20	49.1	2.20	90.1
25.01.2021	23.00	36.9	10.85	51.1	1.37	87.5
26.01.2021	22.47	38.1	10.06	52.9	0.48	96.8
27.01.2021	22.68	36.9	9.78	55.2	0.61	98.6
28.01.2021	22.09	36.2	9.41	56.0	-1.57	93.4
29.01.2021	22.30	34.6	8.73	55.5	-1.85	95.3
30.01.2021	19.57	33.9	8.02	56.2	-4.07	91.8
31.01.2021	18.70	33.8	7.36	56.6	-5.33	90.3
01.02.2021	20.43	35.0	8.27	54.5	-3.17	88.8
02.02.2021	20.82	36.4	10.41	51.8	-4.64	87.8
03.02.2021	20.37	33.8	8.00	51.5	-5.13	87.0
04.02.2021	19.75	30.2	6.12	51.8	-9.80	85.2
05.02.2021	19.35	27.5	4.43	53.4	-13.43	85.6
06.02.2021	17.83	27.1	2.79	53.5	-15.08	83.9
07.02.2021	18.27	27.4	1.90	53.1	-12.47	87.0

08.02.2021	19.30	27.1	1.62	54.9	-9.80	87.0
09.02.2021	17.42	24.2	0.92	55.2	-15.58	84.3
10.02.2021	16.92	24.1	0.06	54.3	-15.07	82.0
11.02.2021	16.79	23.5	-0.08	54.4	-13.06	81.0
12.02.2021	17.55	27.0	-0.29	53.4	-13.44	86.3
13.02.2021	17.54	25.6	0.66	58.9	-8.07	93.3
14.02.2021	20.48	32.5	2.17	60.8	-5.53	78.2
15.02.2021	18.80	29.8	2.98	57.9	-9.41	76.2
16.02.2021	19.36	29.4	2.49	55.1	-5.60	82.5
17.02.2021	19.77	27.4	3.59	55.4	-11.96	78.7
18.02.2021	19.79	24.4	8.66	50.8	-17.35	76.2
19.02.2021	19.46	26.3	7.97	49.0	-10.96	65.1
20.02.2021	19.87	29.8	9.32	48.5	-6.51	76.9
21.02.2021	20.09	33.8	7.66	53.3	1.63	95.0
22.02.2021	20.34	36.2	7.59	56.2	-0.99	95.0
23.02.2021	21.15	32.2	7.90	53.2	-2.56	94.0
24.02.2021	21.15	34.2	11.56	52.8	2.81	96.5
25.02.2021	22.37	34.6	11.15	57.1	5.71	94.2
26.02.2021	21.37	34.8	15.42	54.5	3.89	84.8
27.02.2021	22.28	33.1	15.84	52.2	1.10	85.7
28.02.2021	20.98	35.8	13.18	52.0	2.66	84.7
01.03.2021	21.99	37.1	11.60	52.5	3.25	80.8
02.03.2021	19.71	33.5	10.81	52.6	3.33	70.8
03.03.2021	18.45	33.2	9.93	53.1	1.58	82.8
04.03.2021	18.74	32.7	9.26	53.6	-0.70	74.2
05.03.2021	19.51	29.5	8.56	52.6	-4.49	67.8
06.03.2021	19.25	28.5	7.29	52.6	-3.43	84.6
07.03.2021	20.71	30.5	6.59	52.6	-3.92	81.5
08.03.2021	21.11	30.2	6.20	51.3	-7.38	80.2
09.03.2021	21.16	30.1	5.04	52.7	-8.15	86.1
10.03.2021	20.94	28.5	4.60	51.6	-9.75	66.8
11.03.2021	21.02	30.3	4.49	51.4	-3.58	65.0
12.03.2021	18.99	30.2	5.04	54.4	-0.02	88.3
13.03.2021	19.90	36.9	6.47	61.4	2.97	86.7
14.03.2021	22.10	38.2	7.69	62.7	2.66	90.3

## Lisa 2. Materjalide tehnilised näitajad

Materjal	Soojus-erijuhtivus $\lambda$	Veeauru difusioonitakistus- tegur $\mu$	Tihedus $\rho$	Allikas
	[W/m·K]	[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	
Gyproc GN13 kipsplaat	0,25	10	900	[29, 40]
Rockwool SUPERROCK	0,035	1	35	[25, 43]
ISOTEX Quatro Nordic laepaneel	0,049	5	159	[27, 44]
Puit	0,13	50	500	[40]
Tellis	0,7	37,6	1700	[40, 44, 45]
Krohv	0,6	10	1800	[36, 45]
Saepuruplaat	0,11	30	700	[44]
PUR-vaht	0,025	60	40	[45]

**Lisa 3. Seespoolse soojusisolatsiooniga sein kondenseerumise ja aurustumise arvutamine kihtide vahel**

<b>Kondenseerumine</b>				<b>Aurustumine</b>			
Mineraalvill - krohv				Mineraalvill - krohv			
	$i_i$	0,000836	kg/m <sup>2</sup> h		$i_i$	0,000864	kg/m <sup>2</sup> h
	$i_a$	2,3E-05	kg/m <sup>2</sup> h		$i_a$	1,75E-05	kg/m <sup>2</sup> h
	$W_t$	1,756	kg/m <sup>2</sup>		$W_v$	1,904	kg/m <sup>2</sup>
Krohv - telliskivi				Krohv - telliskivi			
	$i_i$	5,38E-05	kg/m <sup>2</sup> h		$i_i$	5,38E-05	kg/m <sup>2</sup> h
	$i_a$	3,23E-05	kg/m <sup>2</sup> h		$i_a$	2,52E-05	kg/m <sup>2</sup> h
	$W_t$	0,046	kg/m <sup>2</sup>		$W_v$	0,171	kg/m <sup>2</sup>
Telliskivi - õhkvahe				Telliskivi - õhkvahe			
	$i_i$	6,57E-05	kg/m <sup>2</sup> h		$i_i$	5,33E-05	kg/m <sup>2</sup> h
	$i_a$	2,66E-05	kg/m <sup>2</sup> h		$i_a$	2,52E-05	kg/m <sup>2</sup> h
	$W_t$	0,084	kg/m <sup>2</sup>		$W_v$	0,170	kg/m <sup>2</sup>
Õhkvahe - telliskivi				Õhkvahe - telliskivi			
	$i_i$	8,28E-05	kg/m <sup>2</sup> h		$i_i$	5,33E-05	kg/m <sup>2</sup> h
	$i_a$	1,85E-05	kg/m <sup>2</sup> h		$i_a$	2,53E-05	kg/m <sup>2</sup> h
	$W_t$	0,139	kg/m <sup>2</sup>		$W_v$	0,170	kg/m <sup>2</sup>
Telliskivi - õhkvahe				Telliskivi - õhkvahe			
	$i_i$	4,42E-05	kg/m <sup>2</sup> h		$i_i$	2,49E-05	kg/m <sup>2</sup> h
	$i_a$	2,79E-05	kg/m <sup>2</sup> h		$i_a$	5,52E-05	kg/m <sup>2</sup> h
	$W_t$	0,035	kg/m <sup>2</sup>		$W_v$	0,173	kg/m <sup>2</sup>
Õhkvahe - telliskivi				Õhkvahe - telliskivi			
	$i_i$	4,95E-05	kg/m <sup>2</sup> h		$i_i$	2,48E-05	kg/m <sup>2</sup> h
	$i_a$	1,59E-05	kg/m <sup>2</sup> h		$i_a$	5,57E-05	kg/m <sup>2</sup> h
	$W_t$	0,073	kg/m <sup>2</sup>		$W_v$	0,174	kg/m <sup>2</sup>
Kokku $W_t$		2,133	kg/m <sup>2</sup>	Kokku $W_v$		2,761	kg/m <sup>2</sup>
$W_t > 1,0 \text{ kg/m}^2$		Tingimus ei ole täidetud.		$W_t < W_v$		Tingimus täidetud, kuid kondenseerumise tingimus täitmata.	

#### Lisa 4. Temperatuuride ja niiskuse jaotus analüüsitavas seinas iga kuu kohta

Kuu	Jaanuar									
/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur $\mu$	Soojus- erijuhtivus $\lambda_d$	Soojus- takistus R	Temperatuur $\theta$	Maksi- maalne veeauru osaõhk $P_{sat}$	Veeauru- takistus Z	Veeauru osarõhk P	Suhteline niiskus RH $\varphi$	Märkus
Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[W/(mK)]	[m²K/W]	[°C]	[Pa]	$[\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}]$	[Pa]	[%]	
Siseõhk					19,3	2243		1427	64	EI TEKI KONDENSAATI
Sisepinna soojustakistus					18,1	2073		1427	69	EI TEKI KONDENSAATI
Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10	0,25	0,05	17,6	2011	0,188	1407	70	EI TEKI KONDENSAATI
ROCKWOOL Superrock soojustus	50	1	0,035	1,43	3,8	800	0,075	1399	175	Kondensaat
Krohvi	15	10	0,65	0,02	3,5	787	0,225	1376	175	Kondensaat
Tellis	130	16	0,7	0,19	1,7	693	3,120	1046	151	Kondensaat
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	-0,9	565	0,075	1038	184	Kondensaat
Tellis	160	16	0,7	0,23	-3,2	469	3,840	633	135	Kondensaat
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	-5,8	373	0,075	625	167	Kondensaat
Tellis	130	16	0,7	0,19	-7,6	319	3,120	296	93	EI TEKI KONDENSAATI
Krohvi	15	10	0,65	0,02	-7,9	313	0,225	272	87	EI TEKI KONDENSAATI
Välispinna soojustakistus					-8,3	303		272	90	EI TEKI KONDENSAATI
Välisõhk										
Kokku					2,85	10,94				

Kuu	Veebruar									
/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur $\mu$	Soojus- erijuhtivus $\lambda_d$	Soojus- takistus R	Temperatuur $\theta$	Maksi- maalne veeauru osaõhk $P_{sat}$	Veeauru- takistus Z	Veeauru osarõhk P	Suhteline niiskus RH $\varphi$	Märkus
Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[W/(mK)]	[m²K/W]	[°C]	[Pa]	$[\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}]$	[Pa]	[%]	
Siseõhk				0,13	18,9	2179		1557	71	EI TEKI KONDENSAATI
Sisepinna soojustakistus					17,5	1994		1557	78	EI TEKI KONDENSAATI
Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10	0,25	0,05	16,9	1927	0,188	1533	80	EI TEKI KONDENSAATI
ROCKWOOL Superrock soojustus	50	1	0,035	1,43	1,4	677	0,075	1524	225	Kondensaat
Krohv	15	10	0,65	0,02	1,2	665	0,225	1496	225	Kondensaat
Tellis	130	16	0,7	0,19	-0,8	570	3,120	1103	193	Kondensaat
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	-3,8	443	0,075	1094	247	Kondensaat
Tellis	160	16	0,7	0,23	-6,3	358	3,840	610	170	Kondensaat
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	-9,3	275	0,075	601	218	Kondensaat
Tellis	130	16	0,7	0,19	-11,3	230	3,120	208	91	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	-11,6	225	0,225	180	80	EI TEKI KONDENSAATI
Välispinna soojustakistus				0,04	-12,0	216		180	83	EI TEKI KONDENSAATI
Välisõhk										
Kokku				2,85			10,94			

Kuu	Märts									
/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur $\mu$	Soojus- erijuhtivus $\lambda_d$	Soojus- takistus R	Temperatuur $\theta$	Maksi- maalne veeauru osaõhk $P_{sat}$	Veeauru- takistus Z	Veeauru osarõhk P	Suhteline niiskus RH $\varphi$	Märkus
Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[W/(mK)]	[m²K/W]	[°C]	[Pa]	$[\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}]$	[Pa]	[%]	
Siseõhk				0,13	19,9	2319		1440	62	EI TEKI KONDENSAATI
Sisepinna soojustakistus					18,8	2167		1440	66	EI TEKI KONDENSAATI
Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10	0,25	0,05	18,4	2112	0,188	1421	67	EI TEKI KONDENSAATI
ROCKWOOL Superrock soojustus	50	1	0,035	1,43	6,4	964	0,075	1413	147	Kondensaat
Krohv	15	10	0,65	0,02	6,3	951	0,225	1390	146	Kondensaat
Tellis	130	16	0,7	0,19	4,7	854	3,120	1069	125	Kondensaat
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	2,4	725	0,075	1062	146	Kondensaat
Tellis	160	16	0,7	0,23	0,5	632	3,840	667	106	Kondensaat
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	-1,8	524	0,075	659	126	Kondensaat
Tellis	130	16	0,7	0,19	-3,4	460	3,120	338	74	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	-3,6	452	0,225	315	70	EI TEKI KONDENSAATI
Välispinna soojustakistus				0,04	-3,9	440		315	72	EI TEKI KONDENSAATI
Välisõhk										
Kokku				2,85			10,94			

Kuu	Aprill									
/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur μ	Soojus- erijuhtivus λ <sub>d</sub>	Soojus- takistus R	Temperatuur θ	Maksi- maalne veeauru osaõhk P <sub>sat</sub>	Veeauru- takistus Z	Veeauru osarõhk P	Suhteline niiskus RH φ	Märkus
Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[W/(mK)]	[m <sup>2</sup> *K/ W]	[°C]	[Pa]	[ $\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}$ ]	[Pa]	[%]	
Siseõhk					20,8	2452		1200	49	EI TEKI KONDENSAATI
Sisepinna soojustakistus					20,0	2335		1200	51	EI TEKI KONDENSAATI
Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10	0,25	0,05	19,7	2291	0,188	1189	52	EI TEKI KONDENSAATI
ROCKWOOL Superrock soojustus	50	1	0,035	1,43	11,0	1308	0,075	1184	91	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	10,8	1296	0,225	1171	90	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	9,7	1201	3,120	982	82	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	8,0	1071	0,075	978	91	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	160	16	0,7	0,23	6,6	974	3,840	746	77	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	4,9	866	0,075	741	86	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	3,8	799	3,120	553	69	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	3,6	791	0,225	540	68	EI TEKI KONDENSAATI
Välispinna soojustakistus					3,4	778		540	69	EI TEKI KONDENSAATI
Välisõhk										
Kokku					2,85			10,94		



Kuu	Mai									
/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur μ	Soojus- erijuhtivus λ <sub>d</sub>	Soojus- takistus R	Temperatuur θ	Maksi- maalne veeauru osaõhk P <sub>sat</sub>	Veeauru- takistus Z	Veeauru osarõhk P	Suhteline niiskus RH φ	Märkus
Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[W/(mK)]	[m²K/W]	[°C]	[Pa]	[ $\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}$ ]	[Pa]	[%]	
Siseõhk					21,5	2566		868	34	EI TEKI KONDENSAATI
Sisepinna soojustakistus					21,0	2480		868	35	EI TEKI KONDENSAATI
Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10	0,25	0,05	20,7	2447	0,188	868	35	EI TEKI KONDENSAATI
ROCKWOOL Superrock soojustus	50	1	0,035	1,43	14,6	1666	0,075	868	35	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	14,5	1655	0,225	868	52	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	14,5	1655	3,120	867	52	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	13,8	1572	0,075	863	55	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	160	16	0,7	0,23	12,6	1455	3,840	863	59	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	11,6	1364	0,075	857	63	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	10,4	1260	3,120	857	68	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	9,6	1195	0,225	852	71	EI TEKI KONDENSAATI
Välispinna soojustakistus					9,5	1187		852	72	EI TEKI KONDENSAATI
Välisõhk					9,3	1174		852	73	EI TEKI KONDENSAATI
Kokku					2,85			10,94		

Kuu	Juuni									
/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur μ	Soojus- erijuhtivus λ <sub>d</sub>	Soojus- takistus R	Temperatuur θ	Maksi- maalne veeauru osaõhk P <sub>sat</sub>	Veeauru- takistus Z	Veeauru osarõhk P	Suhteli ne niiskus RH φ	Märkus
Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[W/(mK)]	[m²*K/W]	[°C]	[Pa]	[ $\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}$ ]	[Pa]	[%]	
Siseõhk	0,13				22,5	2726		354	13	EI TEKI KONDENSAATI
Sisepinna soojustakistus					22,3	2688		354	13	EI TEKI KONDENSAATI
Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10	0,25	0,05	22,2	2673	0,188	374	14	EI TEKI KONDENSAATI
ROCKWOOL Superrock soojustus	50	1	0,035	1,43	19,6	2282	0,075	382	17	EI TEKI KONDENSAATI
Krohvi	15	10	0,65	0,02	19,6	2276	0,225	406	18	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	19,2	2229	3,120	737	33	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	18,7	2160	0,075	745	34	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	160	16	0,7	0,23	18,3	2105	3,840	1153	55	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	17,8	2040	0,075	1161	57	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	17,5	1997	3,120	1492	75	EI TEKI KONDENSAATI
Krohvi	15	10	0,65	0,02	17,4	1992	0,225	1516	76	EI TEKI KONDENSAATI
Välispinna soojustakistus	0,04				17,4	1983		1516	76	EI TEKI KONDENSAATI
Välisõhk					17,4	1983		1516	76	EI TEKI KONDENSAATI
Kokku	2,85						10,94			

Kuu	Juuli									
/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur $\mu$	Soojus- erijuhtivus $\lambda_d$	Soojus- takistus R	Temperatuur $\theta$	Maksi- maalne veeauru osaõhk $P_{sat}$	Veeauru- takistus Z	Veeauru osarõhk P	Suhteline niiskus RH $\varphi$	Märkus
Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[W/(mK)]	[m²K/W]	[°C]	[Pa]	$\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}$	[Pa]	[%]	
Siseõhk				0,13	22,3	2685		483	18	EI TEKI KONDENSAATI
Sisepinna soojustakistus					21,9	2634		483	18	EI TEKI KONDENSAATI
Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10	0,25	0,05	21,8	2615	0,188	497	19	EI TEKI KONDENSAATI
ROCKWOOL Superrock soojustus	50	1	0,035	1,43	18,4	2110	0,075	502	24	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	18,3	2103	0,225	518	25	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	17,9	2044	3,120	739	36	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	17,2	1959	0,075	745	38	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	160	16	0,7	0,23	16,6	1892	3,840	1017	54	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	16,0	1812	0,075	1022	56	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	15,5	1761	3,120	1244	71	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	15,5	1754	0,225	1260	72	EI TEKI KONDENSAATI
Välispinna soojustakistus				0,04	15,4	1744		1260	72	EI TEKI KONDENSAATI
Välisõhk										
Kokku				2,85			10,94			

Kuu	August									
/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur μ	Soojus- erijuhtivus λ <sub>d</sub>	Soojus- takistus R	Temperatuur θ	Maksi- maalne veeauru osaõhk P <sub>sat</sub>	Veeauru- takistus Z	Veeauru osarõhk P	Suhteline niiskus RH φ	Märkus
Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[W/(mK)]	[m²*K/W]	[°C]	[Pa]	$[\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}]$	[Pa]	[%]	
Siseõhk	0,13				22,2	2679		465	17	EI TEKI KONDENSAATI
Sisepinna soojustakistus					21,9	2626		465	18	EI TEKI KONDENSAATI
Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10	0,25	0,05	21,8	2606	0,188	480	18	EI TEKI KONDENSAATI
ROCKWOOL Superrock soojustus	50	1	0,035	1,43	18,2	2085	0,075	486	23	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	18,1	2078	0,225	503	24	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	17,6	2017	3,120	747	37	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	16,9	1930	0,075	753	39	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	160	16	0,7	0,23	16,4	1861	3,840	1053	57	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	15,7	1779	0,075	1058	599	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	15,2	1727	3,120	1302	75	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	15,1	1720	0,225	1320	77	EI TEKI KONDENSAATI
Välispinna soojustakistus	0,04				15,0	1709		1320	77	EI TEKI KONDENSAATI
Välisõhk										
Kokku	2,85						10,94			

Kuu	September									
/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur $\mu$	Soojus- erijuhtivus $\lambda_d$	Soojus- takistus R	Temperatuur $\theta$	Maksi- maalne veeauru osaõhk $P_{sat}$	Veeauru- takistus Z	Veeauru osarõhk P	Suhteline niiskus RH $\phi$	Märkus
Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[W/(mK)]	[m²K/W]	[°C]	[Pa]	$[\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}]$	[Pa]	[%]	
Siseõhk				0,13	21,7	2588		694	27	EI TEKI KONDENSAATI
Sisepinna soojustakistus					21,1	2508		694	28	EI TEKI KONDENSAATI
Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10	0,25	0,05	20,9	2478	0,188	700	28	EI TEKI KONDENSAATI
ROCKWOOL Superrock soojustus	50	1	0,035	1,43	15,3	1741	0,075	703	40	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	15,2	1731	0,225	711	41	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	14,5	1652	3,120	818	50	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	13,4	1539	0,075	820	53	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	160	16	0,7	0,23	12,5	1451	3,840	952	66	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	11,4	1350	0,075	955	71	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	10,7	1286	3,120	1062	83	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	10,6	1278	0,225	1069	84	EI TEKI KONDENSAATI
Välispinna soojustakistus				0,04	10,5	1265		1069	85	EI TEKI KONDENSAATI!
Välisõhk										
Kokku				2,85			10,94			

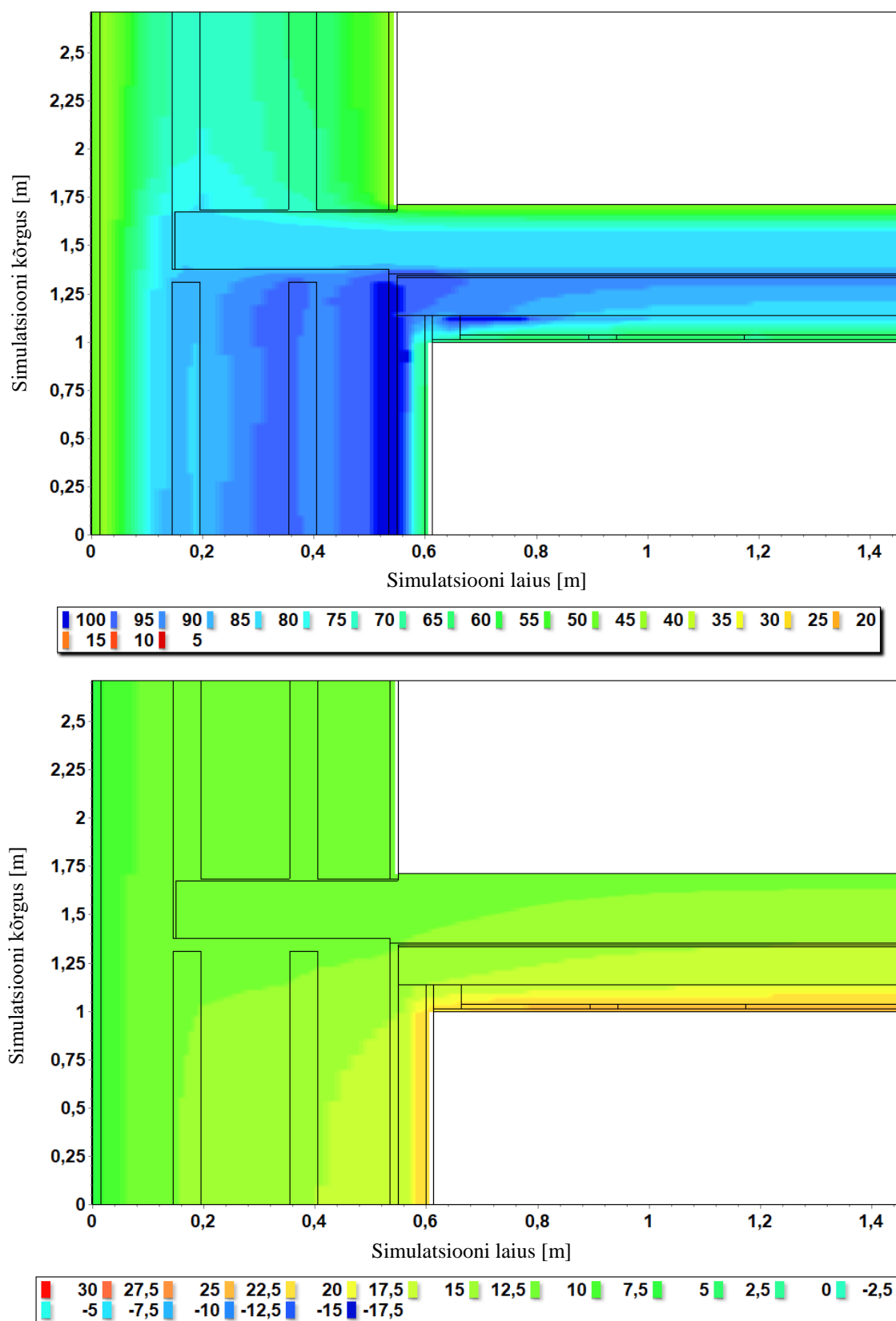
Kuu	Oktoober									
/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur $\mu$	Soojus- erijuhtivus $\lambda_d$	Soojus- takistus R	Temperatuur $\theta$	Maksi- maalne veeauru osaõhk $P_{sat}$	Veeauru- takistus Z	Veeauru osarõhk P	Suhteline niiskus RH $\varphi$	Märkus
Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[W/(mK)]	[m²K/W]	[°C]	[Pa]	$[\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}]$	[Pa]	[%]	
Siseõhk				0,13	21,3	2534		811	32	EI TEKI KONDENSAATI
Sisepinna soojustakistus					20,7	2439		811	33	EI TEKI KONDENSAATI
Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10	0,25	0,05	20,5	2403	0,188	813	34	EI TEKI KONDENSAATI
ROCKWOOL Superrock soojustus	50	1	0,035	1,43	13,6	1559	0,075	814	52	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	13,5	1548	0,225	816	53	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	12,6	1461	3,120	849	58	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	11,3	1338	0,075	850	64	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	160	16	0,7	0,23	10,2	1244	3,840	891	72	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	8,9	1138	0,075	892	78	EI TEKI KONDENSAATI
Tellis	130	16	0,7	0,19	8,0	1071	3,120	925	86	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	7,9	1063	0,225	927	87	EI TEKI KONDENSAATI
Välispinna soojustakistus				0,04	7,7	1050		927	88	EI TEKI KONDENSAATI
Välisõhk										
Kokku				2,85			10,94			

Kuu	November									
/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistustegur μ	Soojus- erijuhtivus λ <sub>d</sub>	Soojus- takistus R	Temperatuur θ	Maksi- maalne veeauru osaõhk P <sub>sat</sub>	Veeauru- takistus Z	Veeauru osarõhk P	Suhteline niiskus RH φ	Märkus
Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[W/(mK)]	[m²K/W]	[°C]	[Pa]	[ $\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}$ ]	[Pa]	[%]	
Siseõhk					20,1	2357		1240	53	EI TEKI KONDENSAATI
Sisepinna soojustakistus					19,1	2215		1240	56	EI TEKI KONDENSAATI
Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10	0,25	0,05	18,8	2163	0,188	1226	57	EI TEKI KONDENSAATI
ROCKWOOL Superrock soojustus	50	1	0,035	1,43	7,8	1055	0,075	1221	116	Kondensaat
Krohv	15	10	0,65	0,02	7,6	1043	0,225	1205	116	Kondensaat
Tellis	130	16	0,7	0,19	6,2	945	3,120	981	104	Kondensaat
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	4,0	814	0,075	976	120	Kondensaat
Tellis	160	16	0,7	0,23	2,3	719	3,840	700	97	EI TEKI KONDENSAATI
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	0,1	616	0,075	695	113	Kondensaat
Tellis	130	16	0,7	0,19	-1,3	548	3,120	471	86	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	-1,5	540	0,225	455	84	EI TEKI KONDENSAATI
Välispinna soojustakistus					-1,8	527		455	86	EI TEKI KONDENSAATI
Välisõhk										
Kokku					2,85	10,94				

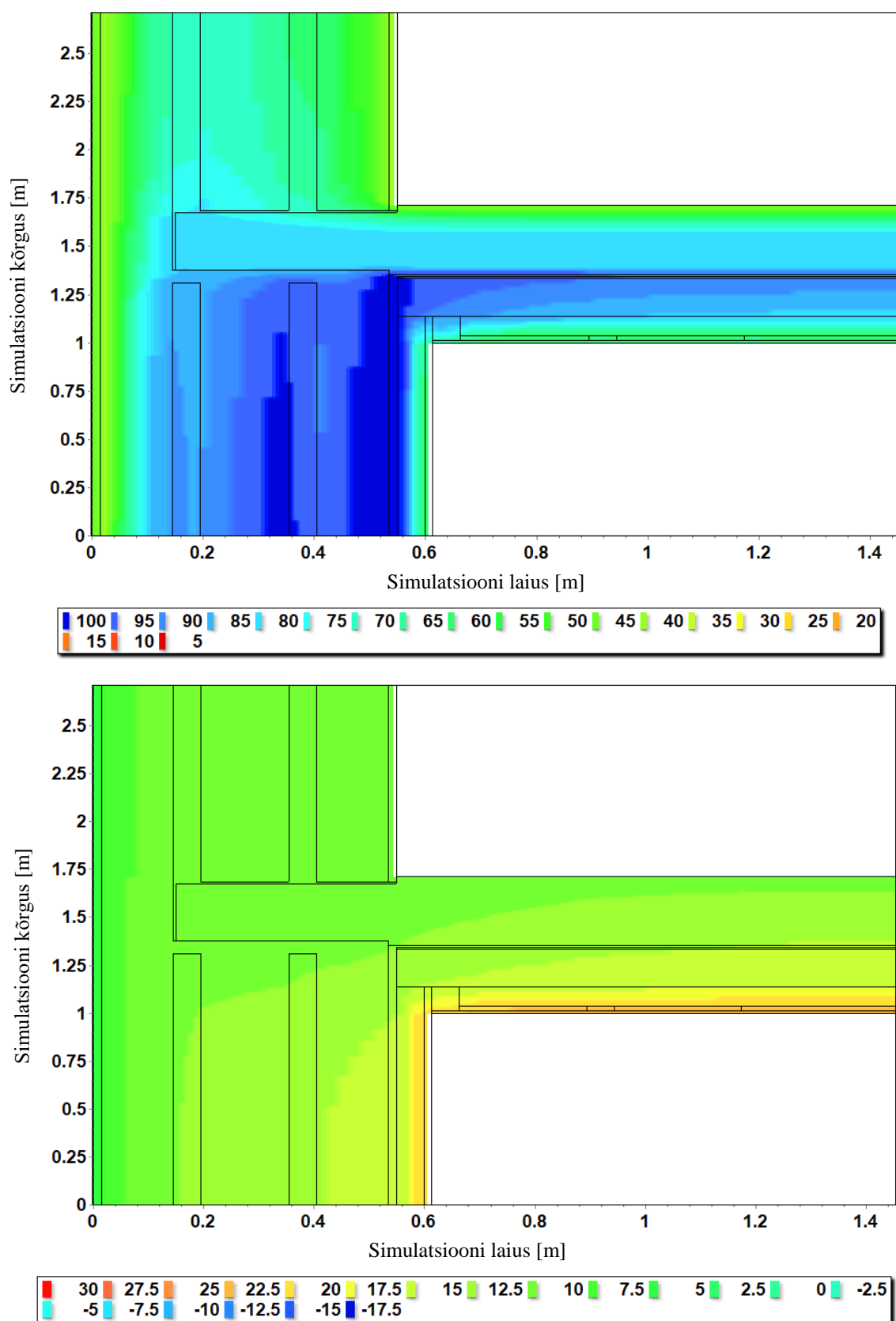
Kuu	Detsember									
/tähis	Paksus d	Difusiooni- takistus- tegur $\mu$	Soojus- erijuhtivus $\lambda_d$	Soojus- takistus R	Temperatuur $\theta$	Maksi- maalne veeauru osaõhk $P_{sat}$	Veeauru- takistus Z	Veeauru osarõhk P	Suhteline niiskus RH $\varphi$	Märkus
Materjali kiht / ühik	[mm]	[-]	[W/(mK)]	[m²K/W]	[°C]	[Pa]	$[\frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{kg \cdot 10^6}]$	[Pa]	[%]	
Siseõhk				0,13	19,4	2249		1434	64	EI TEKI KONDENSAATI
Sisepinna soojustakistus					18,1	2081		1434	69	EI TEKI KONDENSAATI
Gyproc GN13 kipsplaat	12,5	10	0,25	0,05	17,7	2019	0,188	1415	70	EI TEKI KONDENSAATI
ROCKWOOL Superrock soojustus	50	1	0,035	1,43	4,0	812	0,075	1406	173	Kondensaat
Krohv	15	10	0,65	0,02	3,8	799	0,225	1382	173	Kondensaat
Tellis	130	16	0,7	0,19	2,0	705	3,120	1050	149	Kondensaat
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	-0,7	577	0,075	1042	181	Kondensaat
Tellis	160	16	0,7	0,23	-2,9	481	3,840	634	132	Kondensaat
Õhkvahe	50	1	0,18	0,28	-5,5	384	0,075	626	163	Kondensaat
Tellis	130	16	0,7	0,19	-7,3	329	3,120	295	90	EI TEKI KONDENSAATI
Krohv	15	10	0,65	0,02	-7,5	323	0,225	271	84	EI TEKI KONDENSAATI
Välispinna soojustakistus				0,04	-7,9	312		271	87	EI TEKI KONDENSAATI
Välisõhk										
Kokku				2,85			10,94			



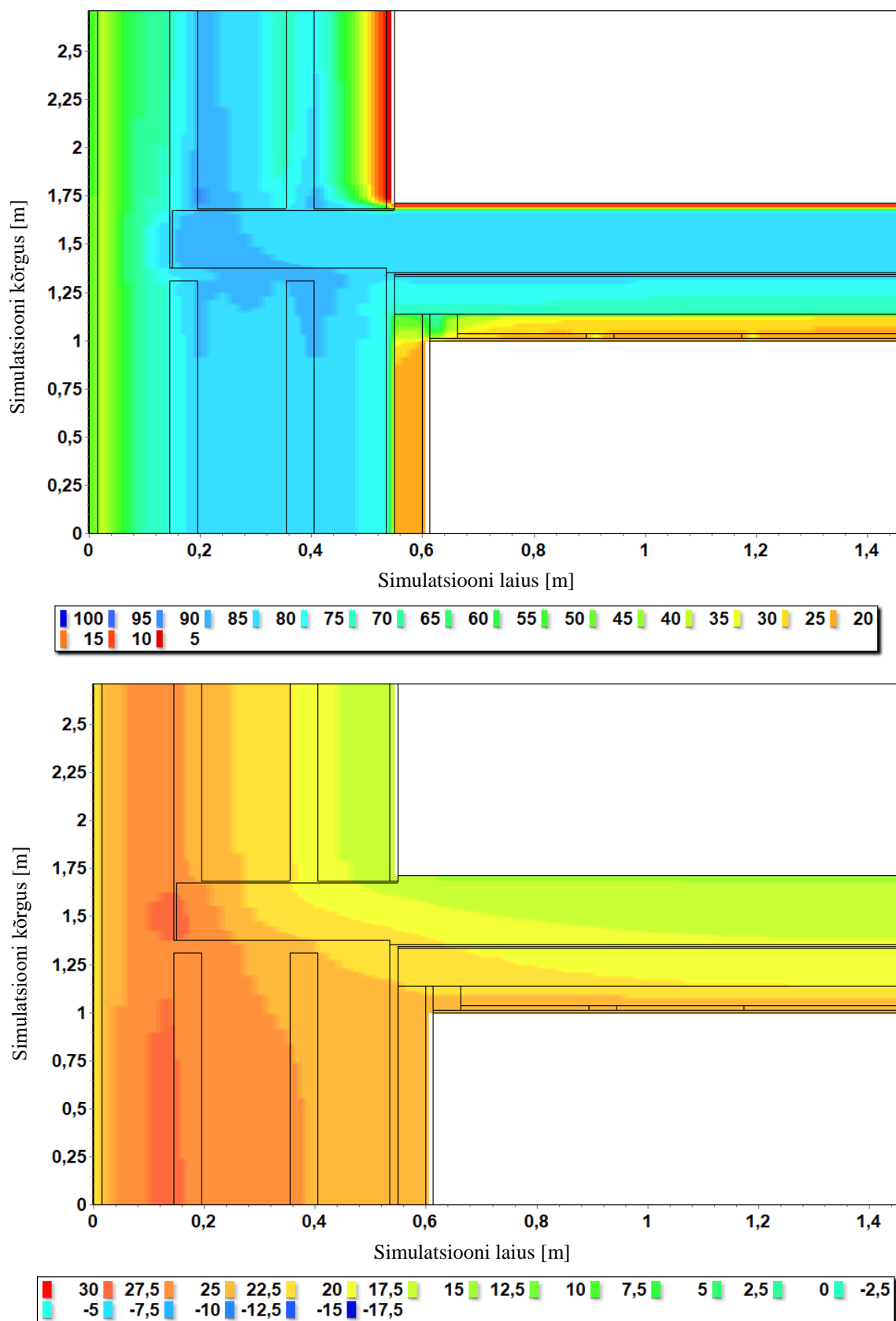
**Lisa 5. Suhtelise õhuniiskuse sisaldus ja temperatuur soojustatud vahelaesõlmel koos aurutõkkega kondensaadi testaasta kevade keskpaigas**



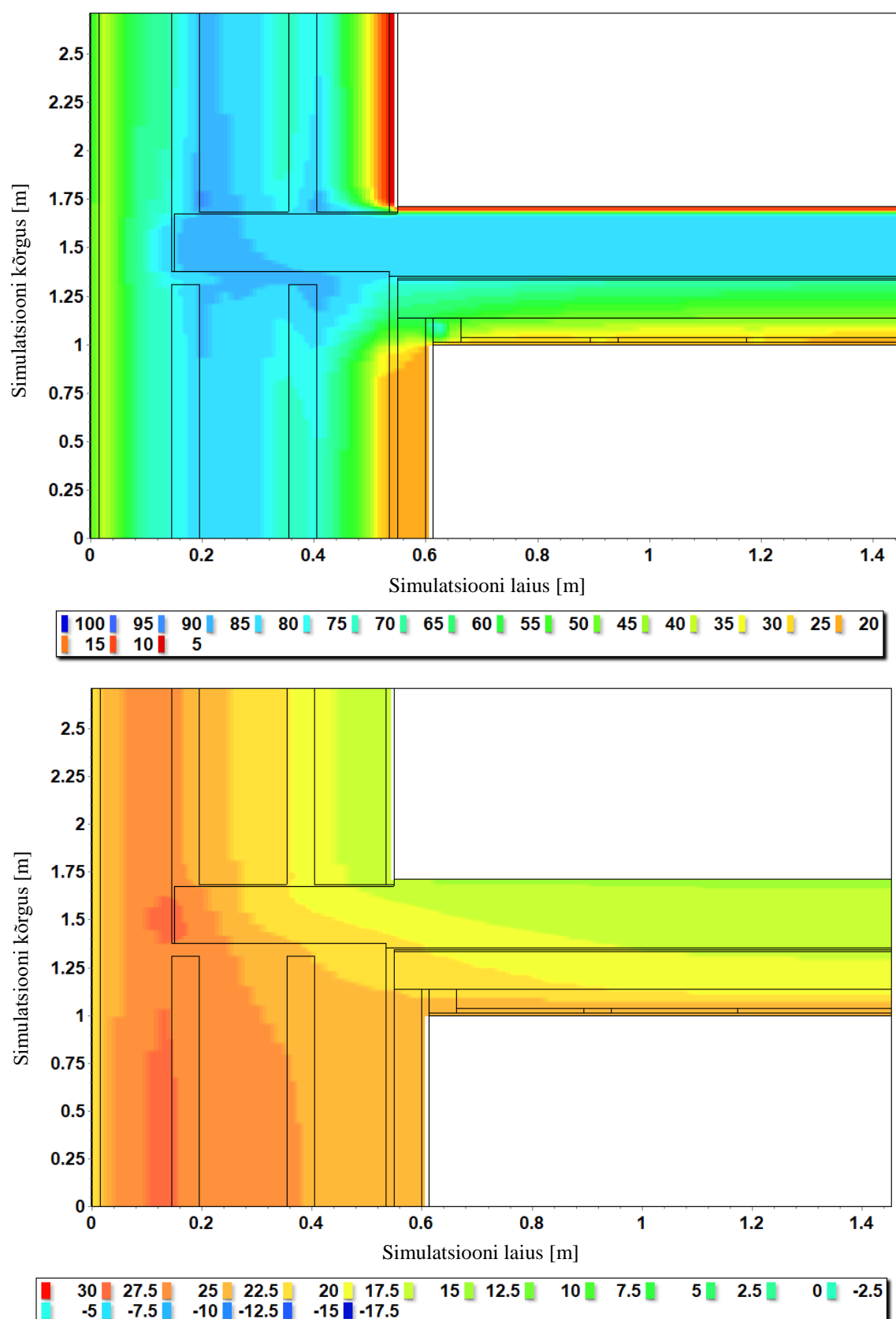
**Lisa 6. Suhtelise õhuniiskuse sisaldus ja temperatuur soojustatud vahelaesõlmel aurutõkketa kondensaadi testaasta kevade keskpaigas**



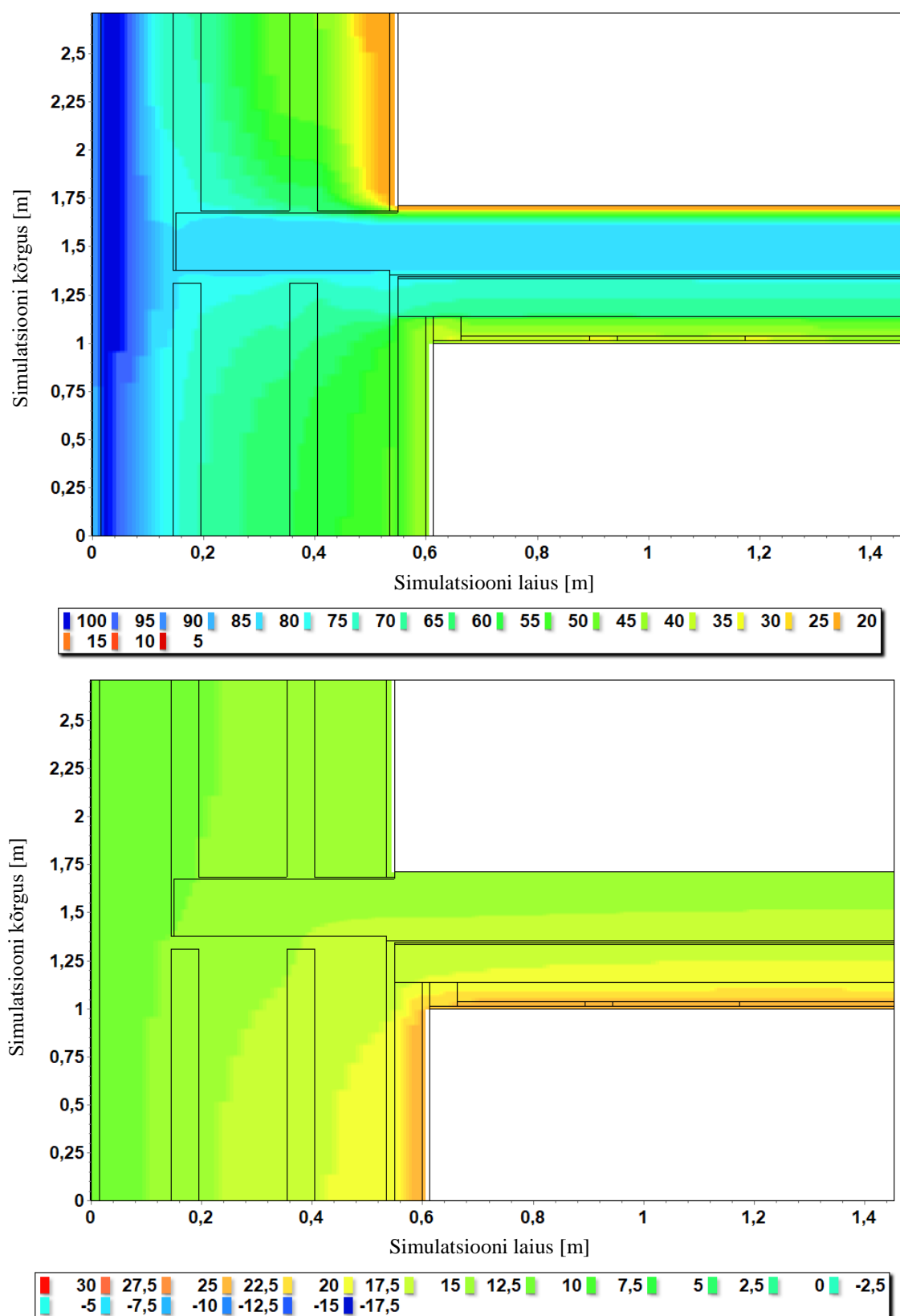
**Lisa 7. Suhtelise õhuniiskuse sisaldus ja temperatuur soojustatud vahelaesõlmel koos aurutõkkega kondensaadi testaasta suve keskpäigas**



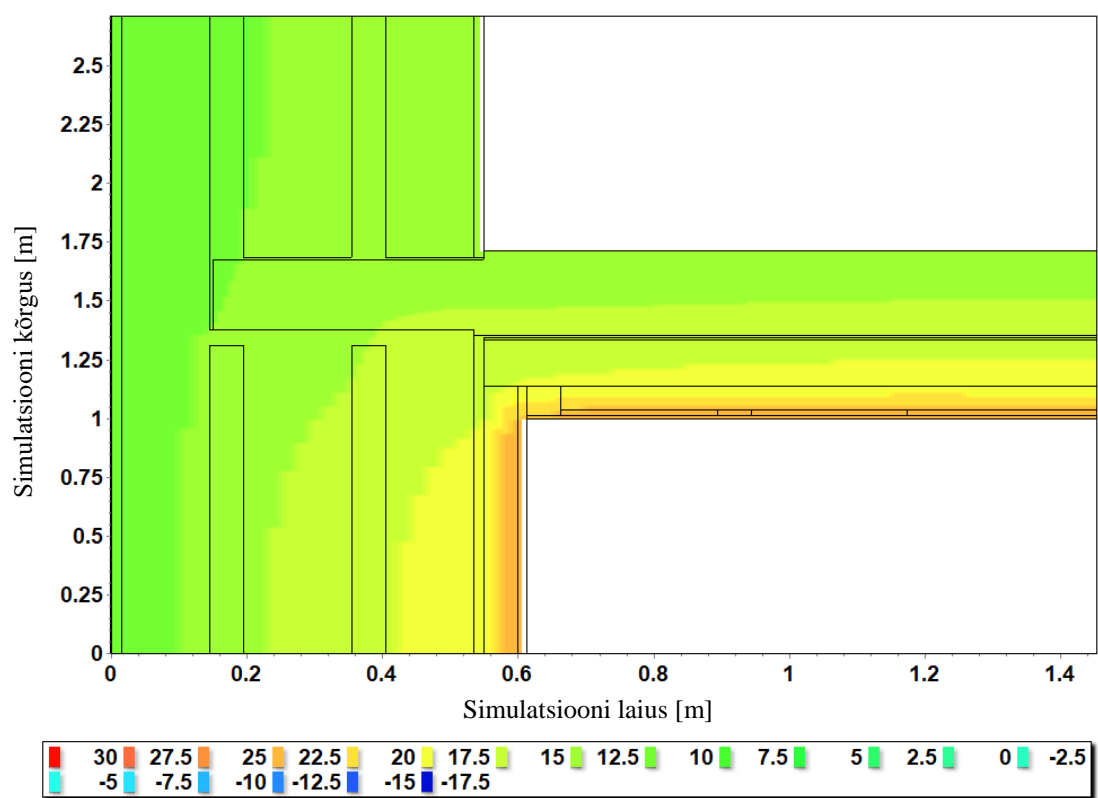
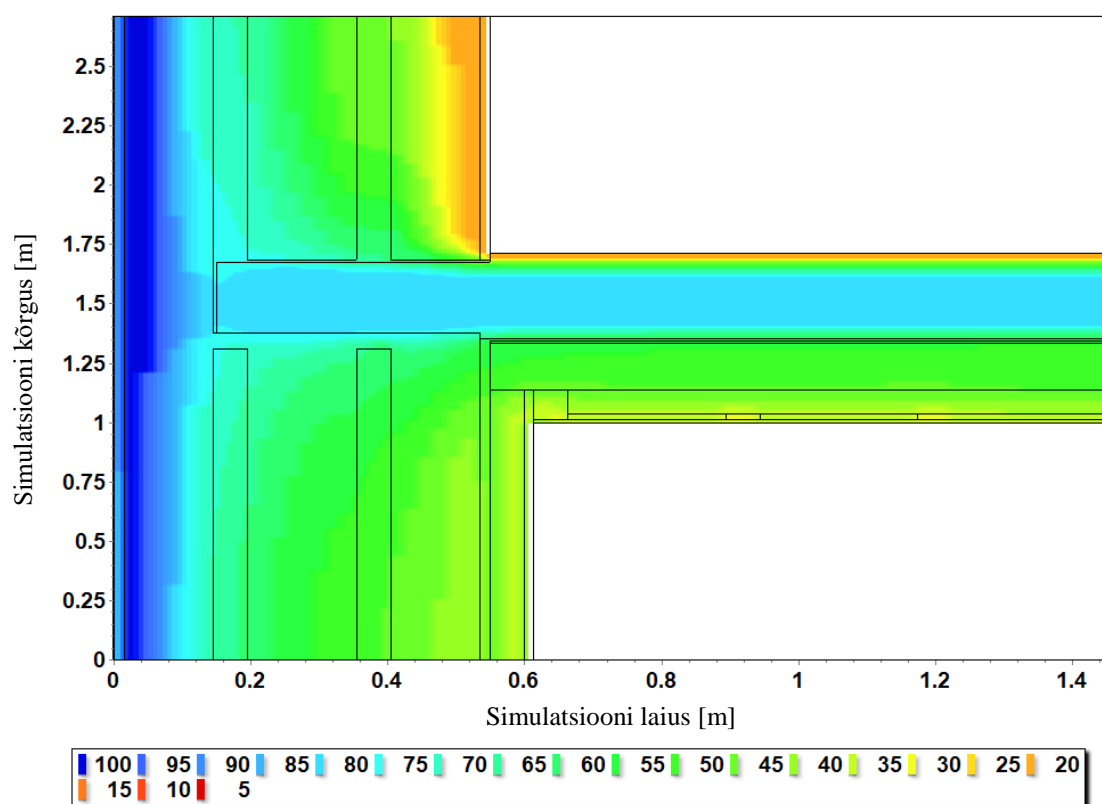
**Lisa 8. Suhtelise õhuniiskuse sisaldus ja temperatuur soojustatud vahelaesõlmel aurutõkketa kondensaadi testaasta suve keskpaigas**



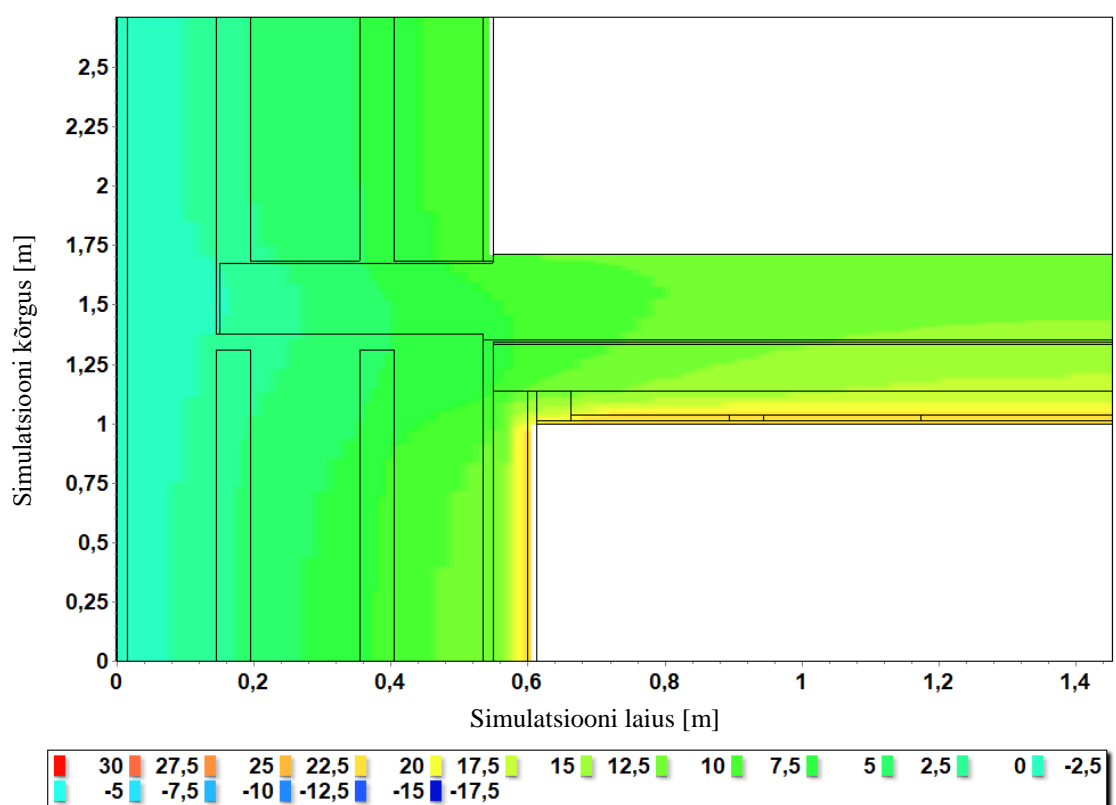
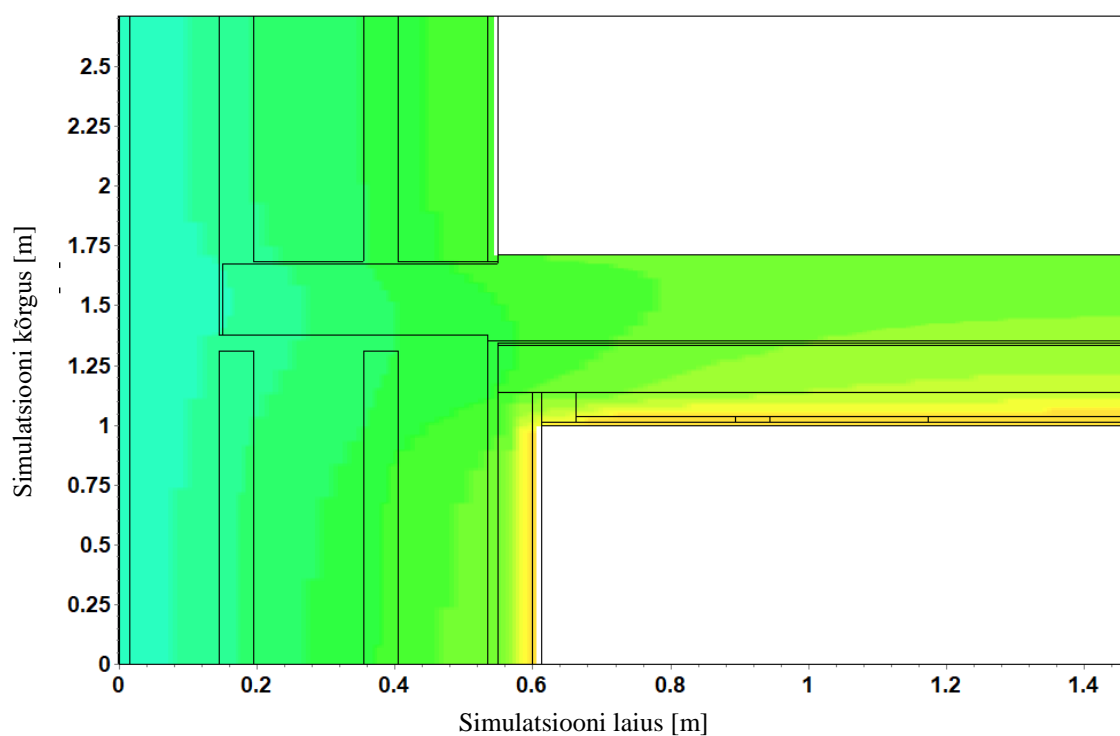
**Lisa 9. Suhtelise õhuniiskuse sisaldus ja temperatuur soojustatud vahelaesõlmel koos aurutõkkega kondensaadi testaasta sügise keskpaigas**



**Lisa 10. Suhtelise õhuniiskuse sisaldus ja temperatuur soojustatud vahelaesõlmel aurutõkketa kondensaadi testaasta sügise keskpaigas**



# **Lisa 11. Temperatuur soojustatud vahelaesõlmel aurutõkketa ja aurutõkkega kondensaadi testaasta talve keskpaigas**

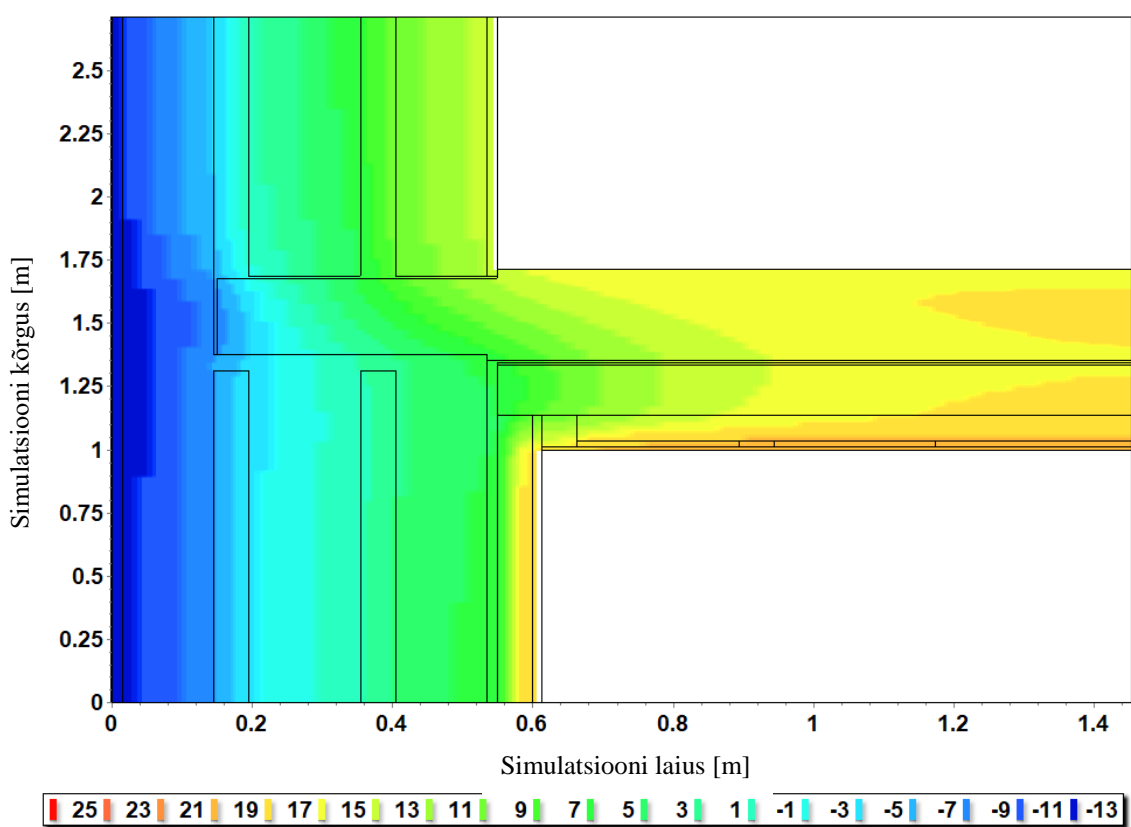
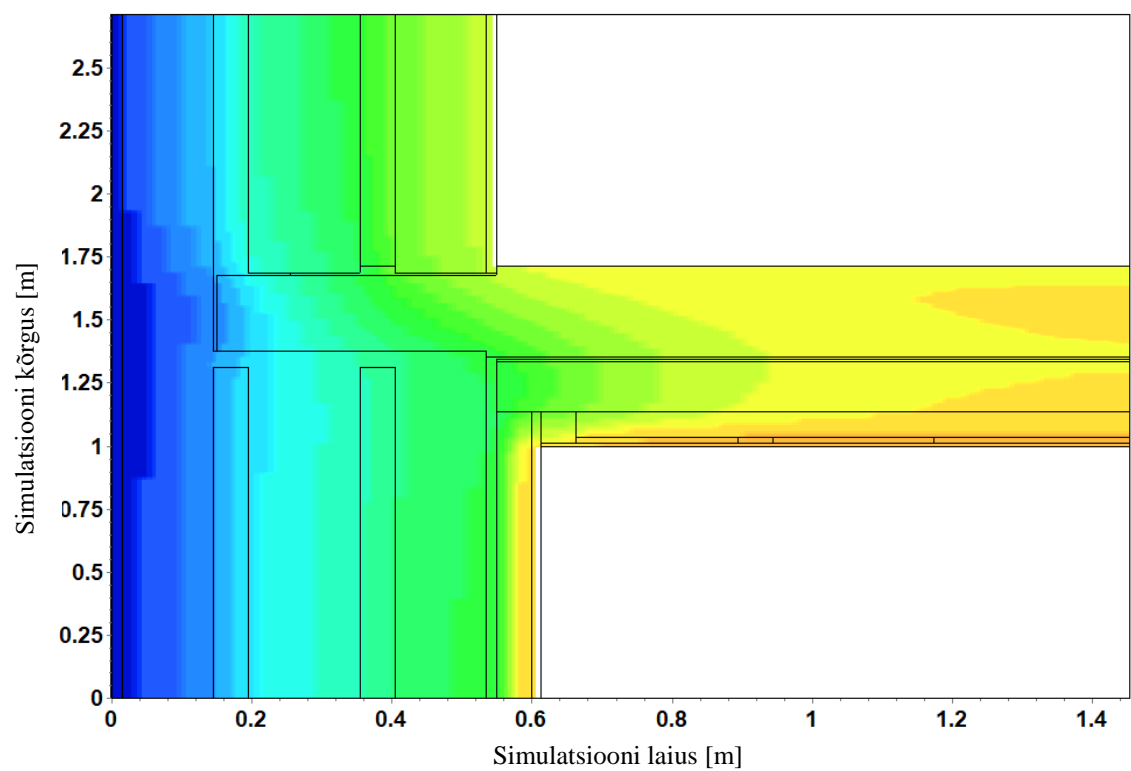


## Lisa 12. II korruse ruumi kütmistabel

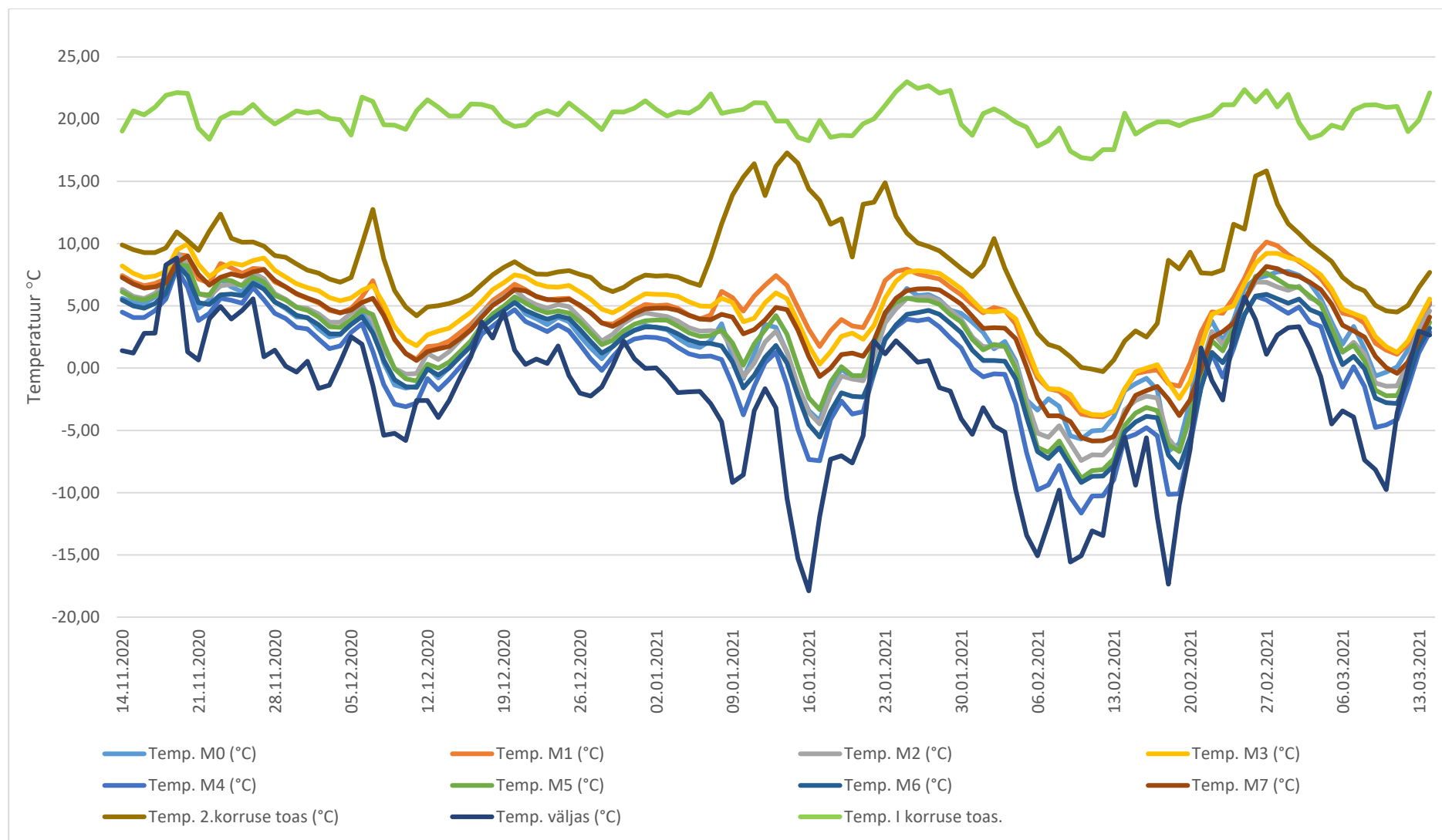
Kuupäev:	Algus:	Lõpp:
22.11.2020	10:54	12:06
06.12.2020	13:18	14:28
07.01.2021	11:15	12:55
08.01.2021	18:25	19:20
09.01.2021	15:05	17:00
10.01.2021	11:40	13:00
10.01.2021	19:00	20:05
12.01.2021	11:25	13:05
13.01.2021	14:30	15:50
14.01.2021	9:25	10:40
14.01.2021	19:50	20:35
15.01.2021	18:05	19:00
16.01.2021	16:55	18:10
17.01.2021	12:50	13:45
18.01.2021	19:30	20:40
20.01.2021	18:15	19:30
21.01.2021	10:30	11:45
22.01.2021	17:50	18:50
01.02.2021	12:45	14:00
17.02.2021	16:50	18:30
18.02.2021	9:50	10:50
19.02.2021	17:00	18:00
23.02.2021	15:00	16:00
25.02.2021	16:45	17:50
26.02.2021	15:15	16:25

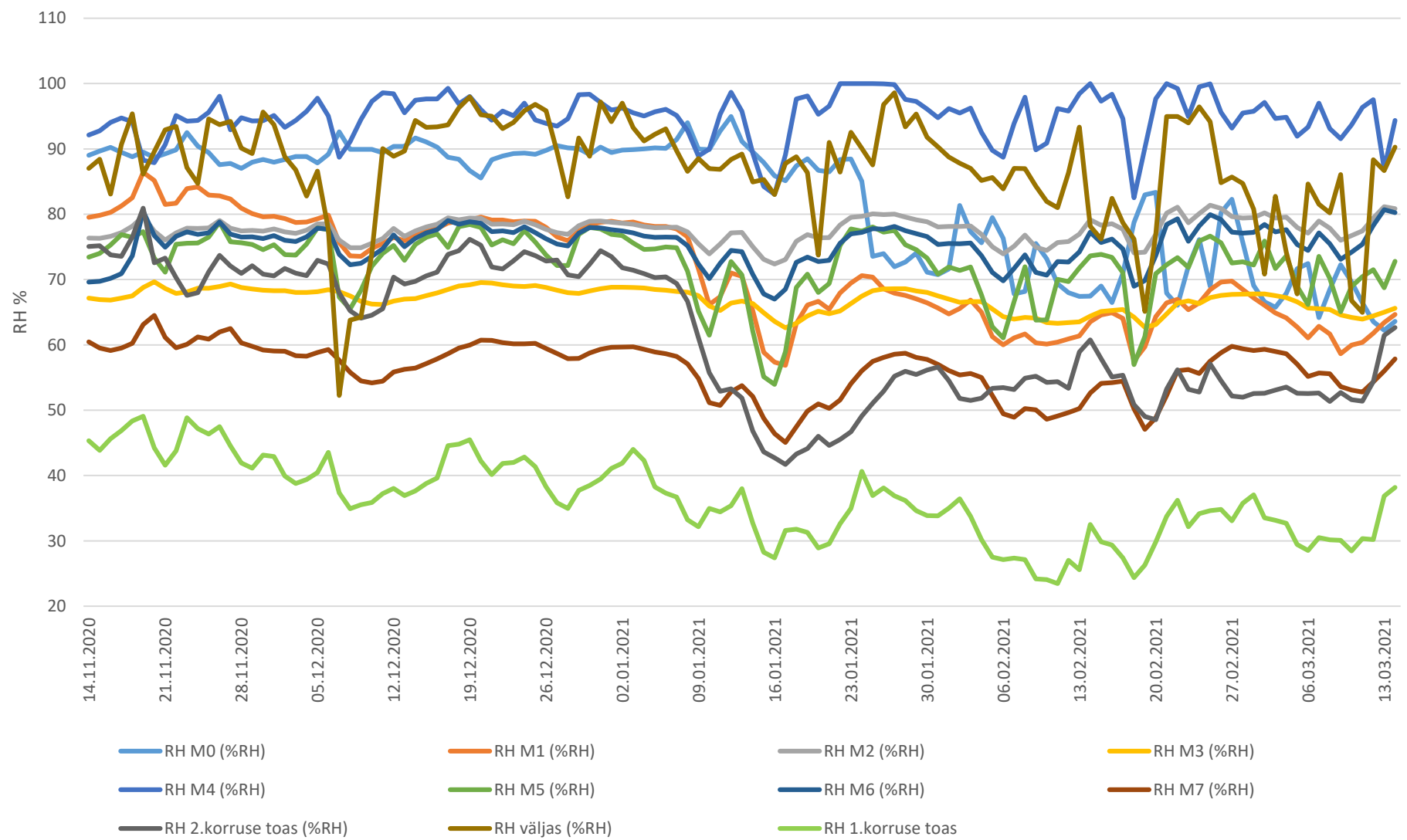


**Lisa 13. Delphini mõõdetud omakliima tihendatud ja avatud talaotste temperatuurid**



**Lisa 14. Katseandmete temperatuurid ja suhtelised õhuniiskused graafikul**





## Lisa 15. Lihtlitsents

### **Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, DORIS TURK,

(sünnipäev pp/kuu/aa 13.07.1994)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö  
Puidust vahelaetade uurimine kiviseina seestpoolt soojustamisel,  
mille juhendaja on Kadri Leiten,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega  
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_/allkirjastatud digitaalselt/\_\_\_\_\_  
allkiri

Tartu, 31.05.2021

---

### **Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_Kadri Leiten\_\_\_/allkirjastatud digitaalselt/\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_31.05.2021\_\_\_  
(kuupäev)

\_\_\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)